تطور علم الطبيعة

تحول الآراء من المبادئ الأولى إلى نظرية النسبية والكمات

تأليف

ألبرت أينشتين

ليوبولد إنفلد

ترجمة

د.محمد عبد المقصود النادي

د. عطية عبد السلام عاشور

الكتاب: تطور علم الطبيعة

الكاتب: ألبرت أينشتين ، ليوبولد إنفلد

ترجمة : د.محمد عبد المقصود النادي ، د. عطية عبد السلام عاشور

الطبعة: ٢٠١٨

الناشر: وكالة الصحافة العربية (ناشرون)

APA

٥ ش عبد المنعم سالم – الوحدة العربية – مدكور- الهرم – الجيزة

جمهورية مصر العربية

هاتف : ٣٥٨٢٥٢٩٣ ـ ٣٥٨٦٧٥٧٦ ـ ٣٥٨٦٧٥٧٥

فاكس : ٣٥٨٧٨٣٧٣

E-mail: news@apatop.comhttp://www.apatop.com

دار الكتب المصرية

فهرسة إثناء النشر

أينشتين ، ألبرت، و إنفلد ، ليوبولد

تطور علم الطبيعة / ألبرت أينشتين، وليوبولد إنفلد

– الجيزة – وكالة الصحافة العربية.

٣٢٨ ص، ١٨ سم.

الترقيم الدولى: ٣ – ٨٢٨ – ٤٤٦ – ٩٧٧– ٩٧٨

أ – العنوان رقم الإيداع : ١٤٨٤٥ / ٢٠١٨

تطور علم الطبيعة





مقدمة

من حق القارئ قبل أن يشرع في قراءة الكتاب أن يتوقع الإجابة على بعض الأسئلة البسيطة كأن يعرف مثلا الغرض من وضع هذا الكتاب والمستوى المطلوب في القارئ كي يتمكن من فهمه.

من العسير أن نبدأ بالإجابة على هذين السؤالين بطريقة واضحة مقنعة، ولعله قد يكون من الأيسر أن نجيب عليها في نهاية الكتاب، على الرغم من أن ذلك يكون غير ذي قيمة عندئذ. ولعلنا نجد من الملائم بيان الأمور التي يهدف إليها بوضع هذا الكتاب؛ فنحن لم نقصد وضع كتاب في علم الطبيعة، ولن يجد القارئ هنا دراسة منظمة للحقائق والنظريات الأولية لهذا العالم. وكان غرضنا الأساسي أن نضع الخطوط الرئيسية لمحاولات العقل البشري إيجاد الارتباط بين عالم الأفكار وعالم الظواهر.

وقد حاولنا أن نبين القوى الفعالة التي تدفع العلم إلى عالم ابتكار الأفكار التي تناظر حقائق عالمنا. ولكن كان من الواجب أن نكون دراستنا بسيطة وكان علينا أن نشق لأنفسنا خلال الحشد الكبير من الحقائق والآراء الطريق الذي يبدو لنا أكثر أهمية وذا معنى واضح. وقد اضطررنا إلى إهمال الحقائق والنظريات التي لا تقع في هذا الطريق. وكان حتما علينا لتحقيق هدفنا العام أن نحدد اختيار الحقائق والآراء التي سندرسها. ويجب ألا يؤثر عدد الصفحات المخصصة لدراسة موضوع ما

في الحكم على أهمية هذا الموضوع. وقد تركنا جانبا بعض اتجاهات الفكر الأساسية ولم يمكن تركنا لها ناتجا عن عدم أهميتها، بل لأنها لا تقع في الطريق الذي اخترناه.

وقد تناقشنا طويلا حين شرعنا في وضع هذا الكتاب في المميزات التي يجب أن تتوفر في قارئنا المثالي وشغلنا كثيرا بهذا الموضوع. وقد تخيلنا أن القارئ سيستعيض عن عدم درايته التامة بعلمي الطبيعة والرياضة، بالتحلي بكثير من الخصال الحميدة؛ فمثلا تخيلناه مهتما بالآراء الطبيعة والفلسفة، وكان علينا أن نعجب بصبره الذي استعان به في تتبع الفقرات المملة والصعبة. وتخيلنا هذا القارئ يقنعنا بأنه لكي يفهم أية صفحة يجب عليه أن يقرأ الصفحات السابقة بعناية، فهو يعلم أن من الخطأ أن يقرأ الكتاب العلمي حتى ولو كان مبسطا بنفس الطريقة التي تقرأ بها القصص.

هذا الكتاب هو محادثة بسيطة بين القارئ وبيننا، وقد يجد القارئ هذا الكتاب منفرا أو محببا إلى النفس، مملا أو مثيرا للاهتمام، ولكن هدفنا يتحقق إذا نجحت هذه الصفحات في إعطاء القارئ فكرة ما عن الجهاد الشاق للعقل البشري المبتكر في سبيل فهم شامل للقوانين التي تتحكم في الظواهر الطبيعية.

ألبرت أينشتين ـ ليوبولد إنفلد

الباب الأول

نشأة وجهة النظر الميكانيكية

القصة الغامضة الكبرى:

توجد الألغاز البوليسية الكاملة في الخيال، وتحتوي مثل هذه الألغاز على جميع الأدلة الضرورية التي تجعلنا نكون نظريتنا الخاصة للحالة. وإذا تتبعنا سلسلة حوادث القصة بدقة فإننا نصل إلى حلها الكامل مباشرة قبل كشف المؤلف عنه في نهاية الكتاب. والحل في ذاته – على عكس الحالة في الألغاز البسيطة – لا يخيب أملنا ويظهر في الوقت المناسب الذي نتوقعه فيه.

هل يمكن تشبيه قارئ مثل هذا الكتاب بالعلماء الذين استمروا خلال الأجيال المتعاقبة يبحثون عن حل لأسرار الطبيعة؟ ورغم عدم وجود وجه لهذه المقارنة، الشئ الذي سيضطرنا إلى تركها فيما بعد، فإنه يوجد لها بعض الدوافع التي يمكن تعميمها وتعديلها لتسهيل مهمة العلم في حل أسرار الكون.

ولا تزال هذه القصة الغامضة الكبرى دون حل، بل إنه لا يمكن الجزم بوجود حل نهائي لها. لقد حصلنا على الكثير نتيجة لقراءة هذه القصة، فقد علَّمتنا مبادئ لغة الطبيعة، ومكنتنا من فهم كثير من الأدلة، وكانت مصدرا للسرور وإثارة الاهتمام يخفف التعب والإرهاق اللذين غالبا ما يصاحبا تقدم العلم. ولكننا نعلم جيدا أنه بالرغم من كثرة الأجزاء التي قُرئت وفهمت، فإننا لا نزال بعيدين عن الحل الكامل إذا وجد، وهو شئ بعيد الاحتمال. وفي كل مرحلة نحاول أن نجد تفسيرا يتفق مع

الأدلة المكتشفة حتى ذلك الوقت. ولقد فسرت النظريات المبنية على التجربة كثيرا من الحقائق ولكن لم يكتشف إلى الآن حل عام يتفق مع جميع الأدلة المعروفة، وفي كثير من الأحيان بعد الاستزادة من القراءة يتضح فشل نظرية كان يظن أنها كاملة كافية، وذلك لظهور حقائق جديدة تناقض النظرية أو يتعذر تفسيرها بها. وكلما تمادينا في القراءة كلما زاد تقديرنا لكمال تصميم الكتاب رغم أن الحل الكامل يبدو كأنه يبتعد كلما تقدمنا.

وفي جميع القصص البوليسية تقريبا، منذ قصص "كونان دويل" الرائعة، يأتي وقت يكون الباحث قد جمع جميع الحقائق اللازمة لمرحلة واحدة على الأقل من مراحل المسألة التي يبحثها. وفي أغلب الأحيان تبدو هذه الحقائق غريبة متفرقة لا علاقة بينها بالمرة. ولكن الباحث البوليسي الخبير يعلم أنه لا يحتاج الآن إلى بحث جديد وأن التفكير البحت يقوده إلى ربط الحقائق التي جمعها ببعضها. وفجأة، ربما أثناء عزفه على الكمان أو تدخينه لغليونه وهو جالس في مقعد مريح تحدث المعجزة! فبالإضافة إلى حصوله على تفسير للأدلة الموجودة يعلم أن أمورا معينة لا بد وأن تكون قد حدثت. ويستطيع الآن أن يخرج ويجمع أدلة جديدة تقوي نظريته، وذلك لأنه يعلم الآن أين يبحث عنها.

ويجب على العالم الذي يقرأ أسرار الكون، إذا سمح لنا أن نعيد استعمال هذه العبارة البالية، أن يجد الحل لنفسه، وذلك لأنه من المتعذر عليه أن يدير الصفحات الأخيرة للكتاب ويقرأها كما اعتاد أن

يفعل قراء القصص الأخرى الذين لا صبر لهم. وفي الحالة الراهنة: القارئ هو نفسه الباحث الذي يحاول أن يفسر ولو لدرجة محدودة العلاقة بين الحوادث وما تدل عليه. ولكي يحصل العالم حتى على حل غير كامل، يجب عليه أن يجمع الحقائق غير المرتبة التي أمكنه الحصول عليها وينظمها ويجعلها مفهومة وذلك باستعمال التفكير المبدع، وهدفنا من الصفحات القادمة، هو وصف عام لعمل علماء الطبيعة، ذلك العمل الذي يناظر التفكير البحت للباحث البوليسي، وسنوجه له أكثر اهتمامنا.

الدليل الأول:

منذ بدأ التفكير الإنساني ومحاولات قراءة القصة الغامضة الكبرى مستمرة، ولكن العلماء لم يبدأوا في فهم لغة هذه القصة إلا منذ زمن يزيد قليلا عن ثلاثما

ئة عام، ومنذ ذلك الوقت – عصر جاليليو ونيوتن – أخذ العلماء يسرعون في القراءة؛ فتكونت وسائل البحث الدقيقة، وطرق الحصول على الأدلة واقتفاء أثرها. ورغم حل بعض الألغاز الطبيعية فقد ظهر بعد الاستزادة من البحث أن كثيرا من الحلول سطحي ولا يسري في جميع الأحوال.

والحركة مسألة أساسية وفي غاية الأهمية، وقد ظلت هذه المسألة غامضة آلافا من السنين وذلك لشدة تعقدها. وجميع الحركات التي نشاهدها في الطبيعة مثل حركة حجر قذف في الهواء، أو حركة سفينة

تسير في البحر، أو حركة عربة تدفع في الطريق، هي في الحقيقة مرتبطة ببعضها أشد الارتباط. ولفهم هذه الظواهر، يحسن أن نبدأ بأبسط الحالات الممكنة ثم نأخذ في دراسة الحالات الأكثر تعقيدا تدريجيا. اعتبر جسما ساكنا بحيث لا توجد حركة على الإطلاق، لتغيير موضع جسم كهذا يلزم التأثير عليه بطريقة ما، كدفعه أو رفعه، أو جعل أجسام أخرى مثل الجياد أو المحركات البخارية تحركه. ويدلنا الإلهام أن الحركة ترتبط بالدفع أو الرفع أو الشد. وكثرة التجربة تدفعنا إلى أن نخاطر ونقول أنه يجب أن يكون الدفع أشد لكي تكون حركة الجسم أسرع. ويكون من الطبيعي أن نستنتج أنه كلما كان التأثير على الجسم أقوى كلما كانت سرعته أكبر فالعربة ذات الجياد الأربعة تتحرك أسرع من العربة ذات الجوادين فقط، وندرك بالبديهة ضرورة ارتباط السرعة بالتأثير.

من الحقائق التي يعرفها قراء القصص البوليسية الخيالية أن الدليل الكاذب يعقد القصة ويؤخر الوصول إلى الحل. وقد كانت طريقة التفكير التي أملاها الإلهام خاطئة وأدت إلى أفكار غير صحيحة عن الحركة، وقد ظلت هذه الأفكار سائدة قرونا كثيرة. وربما كانت مكانة أرستوطاليس العظيمة في جميع أنحاء أوروبا هي السبب الرئيسي في استمرار الاعتقاد في هذه الفكرة البديهية زمنا طويلا. نقتبس من كتاب "الميكانيكا" المنسوب إليه منذ ألفي عام:

"يسكن الجسم المتحرك إذا توقفت القوة التي تحركه عن التأثير".

لقد كان اكتشاف جاليليو لطرق التفكير العلمي وتطبيقاته من أهم ما توصلنا إليه في تاريخ التفكير الإنساني، ولم يبدأ علم الطبيعة حقيقة إلا منذ ذلك الوقت؛ فقد علمنا هذا الاكتشاف ألا نثق دائما بالاستنتاجات البديهية المبنية على الملاحظات السريعة، وذلك لأنها تقود في بعض الأحيان إلى أدلة خاطئة. ولكن أين يخطئ الإلهام؟ هل يكون من الخطأ أن نقول أن العربة التي تجرها جياد تتحرك أسرع من تلك التي يجرها جوادان فقط؟ دعنا نختبر الخواص الأساسية للحركة بدقة، ولنبدأ بالتجارب اليومية البسيطة التي اعتادها الإنسان منذ بدء الحضارة واكتسبها في صراعه للبقاء.

نفرض أن شخصا يدفع عربة في طريق أفقي، إذا توقف هذا الشخص عن الدفع فجأة فإن العربة تستمر في الحركة مسافة قصيرة قبل أن تسكن، ونتساءل الآن: كيف يمكن زيادة هذه المسافة؟.. توجد طرق مختلفة مثل تشحيم العجلات وجعل الطريق أملس للغاية؛ فكلما دارت العجلات بسهولة وكلما كان الطريق أملس، كلما استمرت العربة في الحركة مدة أطول. ما هو التغيير الذي حدث نتيجة لتشحيم العجلات وجعل الطريق أملس للغاية؟.. فقط الإقلال من تأثير العقبات الخارجية؛ فقد تناقص فعل ما يسمى بالاحتكاك في كل من العجلات وبين العجلات والطريق. وهذا في حد ذاته تفسير نظري لحقيقة مشاهدة، وهو في الحقيقة تفسير اختياري. يجب أن تخطو خطوة أخرى مهمة إلى الأمام لنحصل على الدليل الصحيح. تخيل طريقا لا خشونة فيه (أملس ١٠٠٪) وعجلات لا احتكاك فيها على الإطلاق. بذلك لا يوجد ما

يوقف العربة، وعلى ذلك تستمر في الحركة إلى الأبد. لا نصل إلى هذه النتيجة إلا بالتفكير في تجربة مثالية يستحيل إجراؤها فعلا، وذلك لاستحالة التخلص من المؤثرات الخارجية. وهذه التجربة المثالية تبين الدليل الذي هو في الواقع حجر الأساس في ميكانيكا الحركة.

بمقارنة طريقتي التفكير في المسألة يمكننا أن نقول: الفكرة الإلهامية هي: بازدياد التأثير تزداد السرعة. وعلى ذلك تبين السرعة ما إذا كانت هناك قوى خارجية تؤثر على الجسم. الدليل الجديد الذي وجده جاليليو هو: إذا لم يدفع الجسم أو يجر أو يؤثر عليه بأية طريقة أخرى – أو بالاختصار إذا لم تؤثر قوى خارجية على الجسم – فإنه يتحرك بانتظام؛ أي بسرعة ثابتة في خط مستقيم. أي أن السرعة لا تبين ما إذا كان الجسم مؤثرا عليه بقوى خارجية أم لا؟..

وقد صاغ نيوتن نتيجة جاليليو، وهي النتيجة الصحيحة على هيئة قانون القصور الذاتي بعد ذلك بمدة طويلة. وأول شئ في علم الطبيعة يحفظ عن ظهر قلب في المدارس هو هذا القانون، وبعضنا يتذكره في الصورة الآتية:

"يحتفظ كل جسم ساكن أو متحرك حركة منتظمة في خط مستقيم، بحالته إلا إذا اضطر إلى تغييرها نتيجة لتأثير قوى عليه".

لقد رأينا أنه لا يمكن الوصول إلى قانون القصور الذاتي هذا مباشرة من التجارب العملية، وإنما نصل إليه عن طريق التفكير المتقف مع

المشاهدة، ورغم استحالة إجراء التجربة المثالية فعلا، فإنها تؤدي إلى فهم شامل لتجارب حقيقية. من بين الحركات المعقدة المختلفة الموجودة حولنا في الحياة، سنختار الحركة المنتظمة كمثال أول وهي أبسط الحالات لعدم وجود قوى خارجية مؤثرة. نلاحظ أنه لا يمكن تحقيق الحركة المنتظمة عمليا، فالحجر الساقط من برج، أو العربة المدفوعة في الطريق لا يمكن جعلها تتحرك حركة منتظمة تماما، وذلك لاستحالة التخلص من القوى الخارجية.

في القصص البوليسية الجيدة، تقودنا الأدلة الواضحة في أكثر الأحيان إلى الاتهام الخاطئ. بالمثل في محاولتنا فهم قوانين الكون نجد أن التفسيرات البسيطة المبنية على الإلهام تكون في أغلب الأحيان خاطئة. إن التفكير الإنساني ليخلق صورة دائمة التغير للكون، والذي أضافه جاليليو هو تخلصه من وجهة النظر المبنية على الإلهام واستبدالها بأخرى جديدة، وهذا هو مغزى اكتشاف جاليليو.

ويظهر على الفور سؤال آخر يتعلق بالحركة. مادامت السرعة ليست دليلا على القوى الخارجية المؤثرة على الجسم فما هو هذا الدليل؟ لقد وجد جاليليو جواب هذا السؤال كما وجده نيوتن في صورة أكثر اختصارا، وهذه الإجابة دليل جديد في بحثنا.

للحصول على الجواب الصحيح، يجب أن يمعن التفكير في مسألة العربة التي تتحرك على طريق أملس. في هذه التجربة المثالية كان

انتظام الحركة نتيجة لعدم وجود أي قوى خارجية. نفرض أن العربة التي تتحرك بانتظام دفعت في اتجاه حركتها. ماذا يحدث الآن؟.. واضح أن سرعتها تزداد. كذلك من الواضح أنها إذا دفعت في عكس اتجاه حركتها فإن سرعتها تتناقص. في الحالة الأولى تتغير السرعة وتزداد نتيجة للدفع، وفي الحالة الثانية تتغير السرعة وتتناقص نتيجة له، وتلي النتيجة الآتية على الفور: القوى الخارجية تغير السرعة. إذن لا تكون السرعة نفسها نتيجة للدفع، وإنما يكون تغيرها هو النتيجة، وأية قوة إما أن تزيد أو تنقص السرعة على حسب ما إذا كانت في اتجاه الحركة أم في عكسه.

لقد رأى جاليليو ذلك بوضوح وكتب في مؤلفة "علمان جديدان":

"إذا اكتسب جسم سرعة معينة فإنه يبقى محتفظا بها ما دامت المؤثرات الخارجية التي تعمل على تغييرها بالزيادة أو النقصان غير موجودة، وهو شرط لا يمكن توفره إلا على المستويات الأفقية، وذلك لأنه يوجد فعلا سبب لازدياد السرعة في حالة المستويات التي تميل إلى أسفل، كما يوجد سبب لتناقصها في حالة المستويات التي تميل إلى أعلى، وعلى ذلك ينتج أن الحركة على المستوى الأفقي تكون مستمرة، وذلك لأنه إذا كانت السرعة منتظمة فلا يمكن إنقاصها أو من باب أولى ملاشاتها".

إذا تتبعنا الدليل الصحيح فإننا نفهم مسألة الحركة بوضوح، وأساس الميكانيكا الكلاسيكية (القديمة) كما وضعها نيوتن هو العلاقة بين القوة والتغير في السرعة لا السرعة نفسها كما يبدو لنا بالبديهية.

لقد تكلمنا عن فكرتين تلعبان دورين مهمين في الميكانيكا الكلاسيكية: القوة والتغير في السرعة، ولقد عممت كلا من هاتين الفكرتين أثناء تطور العلم، لذلك تلزم دراستهما بدقة.

ما هي القوة؟ نعرف بالبديهية ماذا نعني بهذا اللفظ؟.. لقد نشأت فكرة القوة عن الجهد المبذول في الدفع أو القذف أو الجر من الإحساس العضلي الذي يصاحب كلا من هذه الأعمال. ولكن تعميم فكرة القوة يذهب إلى أبعد من هذه الأمثلة البسيطة بكثرة. يمكننا التفكير في القوة دون أن تتخيل جوادا يجر عربة! ونحن نتكلم عن قوة الجذب بين الأرض والشمس وبين الأرض والقمر، وعن القوة التي تسبب المد والجزر، ونتكلم عن القوة التي تجبرنا الأرض بواسطتها على أن نبقى في دائرة نفوذها (نحن وأي شئ آخر) وعن القوة التي بفضلها تولد الريح الأمواج في البحر وتحرك ورق الأشجار. وعندما نلاحظ تغييرا في السرعة نعزو السبب على العموم إلى قوة خارجية.

كتب نيوتن في مؤلفه "برنسيبيا" يقول: "القوة الخارجية: هي فعل يؤثر على جسم ساكن أو متحرك بانتظام في خط مستقيم لتغيير حالته، وتوجد هذه القوة أثناء تأثيرها فقط ولا تبقى في الجسم بعد انتهاء هذا

التأثير، وذلك لأن الجسم يحتفظ بكل حالة جديدة يصل إليها بواسطة قصوره الذاتي فقط. وتنشأ القوى الخارجية بطرق مختلفة، فقد تنشأ عن الضغط أو التصادم أو عن القوى المركزية".

إذا ألقي حجر من قمة برج، فإن حركته لا تكون منتظمة بحال من الأحوال وتزداد سرعة الحجر أثناء سقوطه. نستنتج إذن وجود قوة خارجية تعمل في اتجاه الحركة، ويمكن التعبير عن ذلك بطريقة أخرى بأن نقول أن الأرض تجذب الحجر. فلنأخذ مثالا آخر: ماذا يحدث عندما يقذف حجر رأسيا إلى أعلى؟ تتناقص السرعة حتى يصل الحجر إلى أقصى ارتفاع له ثم يبدأ في السقوط. القوة التي تسبب هذا التناقص في السرعة هي نفس القوة التي تسبب ازدياد سرعة الجسم الساقط. في إحدى الحالتين كانت القوة في اتجاه الحركة، وفي الحالة الثانية كانت القوة في عكس هذا الاتجاه، والقوة واحدة في الحالتين، ولكنها تسبب ازدياد السرعة أو تناقصها على حسب ما إذا كان الحجر ساقطا أو مقذوفا إلى أعلى.

الكميات المتجهة:

جميع الحركات التي درسناها فيما سبق هي حركات خطية، أي في خط مستقيم، والآن يجب أن نخطو خطوة إلى الأمام، ويمكن فهم قوانين الطبيعة إلى درجة محدودة إذا درسنا أبسط الحالات وتركنا في محاولاتنا الأولى جميع التعقيدات؛ فالخط المستقيم أبسط من المنحني،

ولكن يستحيل الاكتفاء بفهم الحركة في مستقيم فقط؛ فحركة كل من القمر والأرض والنجوم هي حركات في مسارات منحنية، وقد طبقت قوانين الميكانيكا بنجاح باهر على جميع هذه الحركات. والانتقال من الحركة الخطية المستقيمة إلى الحركة على منحن يجلب صعوبات جديدة، ويجب أن تكون لدينا الشجاعة الكافية لتخطي هذه الصعوبات إذا أردنا فهم قواعد الميكانيكا الكلاسيكية التي أعطتنا الإرشادات الأولى، وبذلك كونت نقطة الابتداء في تطور العلم.

اعتبر الآن تجربة مثالية أخرى، حيث تتدحرج كرة منتظمة بانتظام على نضد أملس. نعلم أننا إذا دفعنا الكرة، أي إذا أثرنا عليها بقوة خارجية، فإن سرعتها تتغير. لنفرض الآن أن اتجاه الدفع ليس في اتجاه الحركة كما في حالة العربة وإنما في اتجاه آخر مخالف، وليكن العمودي على هذا الاتجاه مثلا، تأثير القوة، الحركة النهائية بعد توقف تأثير القوة. وحسب قانون القصور الذاتي، تكون سرعتا الكرة قبل وبعد تأثير القوة منتظمتين تماما. ولكن تختلف الحركة المنتظمة بعد تأثيرها، فقد تغير اتجاه الحركة. اتجاه الحركة الابتدائية للكرة واتجاه القوة متعامدان. ولا تكون الحركة النهائية للكرة في أحد هذين الاتجاهين وإنما تقع بينهما، ويكون اتجاهها أقرب إلى اتجاه القوة إذا كان الدفع شديدا وأقرب إلى اتجاه حركتها الأصلي إذا كان الدفع بسيطا والسرعة الابتدائية كبيرة. نستخلص الآن النتيجة الجديدة الآتية على قانون القصور الذاتي: يتغير مقدار السرعة بصفة عامة، وكذا اتجاهها نتيجة لتأثير القوة. وفهم هذه

الحقيقة يمهد الطريق إلى التعميم الذي أدخل على علم الطبيعة بواسطة فكرة الكميات المتجهة.

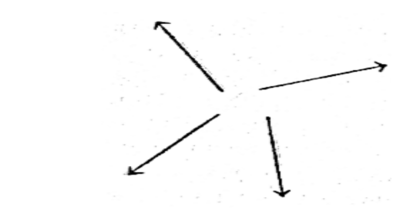
يمكننا أن نستمر في هذه الطريقة المنطقية المباشرة، وتكون نقطة الابتداء مرة أخرى هي قانون القصور الذاتي لجاليليو، إذ لا يزال مجال استخدام نتائج هذا الدليل القيم في كشف لغز الحركة واسعا.

لنعتبر كرتين تتحركان في اتجاهين مختلفين على نضد أملس، ولكي يكون لدينا صورة محددة للمسألة نفرض أن هذين الاتجاهين متعامدان نتيجة لعدم تأثير قوى خارجية، تكون هاتان الحركتان منتظمتين تماما. زيادة على ذلك نفرض أن القيمة العددية لسرعة كلا من الكرتين واحدة، أي أنهما يقطعان نفس المسافة في نفس الفترة الزمنية الواحدة. ولكن هل يكون صحيحا أن نقول أن الكرتين تتحركان بنفس السرعة؟.. يصح أن نجيب على هذا السؤال بنعم أو لا! لقد جرت العادة أن نقول أن سيارتين تسيران بسرعة واحدة إذا كان عداد السرعة في كل منهما يبين أربعين ميلا في الساعة مثلا – مهما كان اتجاها حركتهما – ولكن يجب على العلم أن يخلق لغته الخاصة وأفكاره الخاصة لاستعماله الخاص. غالبا ما تبدأ الأفكار العلمية بتلك المستعملة في اللغة العادية التي تستخدم في الحياة اليومية ولكنها تختلف عنها تماما بعد تطورها؛ فهي تتحول وتتخلص من الغموض الذي كان يلازمها في اللغة العادية وتصبح مضبوطة بدرجة تمكننا من تطبيقها عمليا.

وجهة نظر علم الطبيعة يكون من الأفضل أن نقول أن سرعتي الكرتين المتحركتين في اتجاهين مختلفين مختلفتان، ومن الأنسب أن نقول أنه إذا تحركت أربع سيارات متفرقة من ميدان واحد إلى أربعة شوارع مختلفة متفرعة من هذا الميدان فإن سرعاتها لا تكون متساوية حتى ولو سجلت عدادات السرعة في كل منهما أربعين ميلا في الساعة مثلا. وهذا التفريق بين السرعة وبين قيمتها العددية هو مثل يبين كيف يغير علم الطبيعة إحدى الأفكار المستعملة يوميا بطريقة تثبت فائدتها في تطورات العلم التالية.

إذا قسنا بعدا من الأبعاد فإننا نعبر من النتيجة بعدد معين من الوحدات؛ فطول عصا معينة قد يكون ثلاثة أقدام وتسع بوصات، ووزن جسم معين قد يكون رطلان وثلاثة أوقيات، كما تقاس الفترات الزمنية بالدقائق والثواني. في كل من هذه الحالات نعبر عن نتيجة القياس بعدد، ولكن العدد وحده لا يكفي لوصف بعض الظواهر الطبيعية، ويُعد إدراك هذه الحقيقة تقدما واضحا في طريقة البحث العلمي؛ بالإضافة إلى العدد، يلزم تحديد اتجاه لتعيين سرعة ما. وتسمى أية كمية من هذا القبيل أي ذات مقدار واتجاه: كمية متجهة. والزمن الذي يناسب الكمية المتجهة هو سهم. يمكن تمثيل السرعة بسهم، أو بالاختصار، بمتجه طوله يمثل القيمة العددية للسرعة في نظام وحدات معين واتجاهه هو اتجاه الحركة.

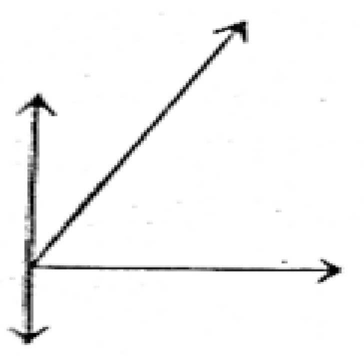
إذا تفرقت أربع سيارات من ميدان واحد بسرعة لها نفس القيمة العددية فإنه يمكن تمثيل سرعاتها بأربعة متجهات متساوية الطول كما هو واضح من الشكل. في المقياس المستعمل تمثل البوصة ٤٠ ميلا في الساعة بهذه الطريقة يمكن تمثيل أية سرعة بمتجه، وبالعكس إذا علم المتجه ومقياس الرسم فمن الممكن الحصول على السرعة.



إذا تقابلت سيارتان تسيران في نفس الطريق في اتجاهين متضادين، وكان عداد السرعة في كل منهما يبين ٤٠ ميلا في الساعة، فإن سرعتيهما تمثلان بمتجهين مختلفين يشير سهم الأول في عكس اتجاه سهم الثاني. بالمثل يجب أن يشير السهمان اللذان يبينان اتجاهي القطارات "من" و"إلى" المدينة في اتجاهين متضادين، ولكن جميع القطارات الموجودة في أرصفة المحطات المختلفة والمتحركة نحو المدينة بسرعة قيمتها العددية واحدة تكون لها نفس السرعة التي يمكن تمثيلها جميعا بمتجه واحد. ولا يوجد أي شئ في هذا المتجه يبين

المحطة التي يمر بها القطار أو الرصيف الخاص الذي كان عليه، ومعنى ذلك أنه حسب المبدأ المتفق عليه، يمكن اعتبار جميع هذه المتجهات وما يماثلها – كما هو مبين في الشكل – متساوية، وهي تقع في نفس الخط أو في خطوط متوازية وتكون متساوية الطول، وأخيرا تشير أسهمها جميعا إلى نفس الاتجاه.

يبين الشكل التالي متجهات غير متساوية، وذلك لأنها تختلف إما في المقدار أو في الاتجاه أو في كليهما، ويمكن رسم الأربعة متجهات هذه بطريقة أخرى بحيث تتفرق جميعها من نقطة واحدة. وحيث أن نقطة الابتداء لا تهم، يمكن أن تمثل هذه المتجهات سرعات أربع سيارات تتفرق من نقطة مرور واحدة، أو سرعات أربع سيارات تتحرك في أربعة أماكن مختلفة من المدينة بسرعات قيمها العددية واتجاهها كما هو مبين في الشكل.



يمكننا الآن استعمال التمثيل بالمتجهات في شرح الحقائق الخاصة بالحركة الخطية التي بحثناها من قبل. لقد تكلمنا عن عربة تتحرك بانتظام في خط مستقيم تدفع في اتجاه حركتها فتزداد سرعتها.

يمكن تمثيل ذلك بيانيا بمتجهين: الأول قصير وبمثل السرعة قبل الدافع، والثاني أطول وله نفس الاتجاه ويمثل السرعة بعد الدفع.. ومعنى المتجه المتقطع واضح، فهو يمثل التغير في السرعة الذي سببه الدفع.

والحالة التي تكون فيها القوة في عكس اتجاه الحركة والتي تنقص فيها السرعة، يختلف فيها الرسم بعض الشئ عما سبق. مرة أخرى يناظر المتجه المنقطع التغير في السرعة ولكن يختلف اتجاهه في هذه الحالة. ومن الواضح أن التغير في السرعة هو كمية متجهة مثل السرعة نفسها. ولكن كل تغيير في السرعة ينتج عن تأثير قوة خارجية، وعلى ذلك يجب أن تمثل هذه القوة بمتجه أيضا. ولكن تعيين القوة لا يكفي أن نحدد الشدة التي تدفع بها العربة، وإنما يجب أن نحدد أيضا اتجاه الدفع. والقوة مثلها في ذلك مثل السرعة ومثل التغير في السرعة يجب تمثيلها بمتجه وليس بعدد فقط. وعلى ذلك: القوة الخارجية هي أيضا كمية متجهة، ويجب أن

يكون اتجاهها هو اتجاه التغير في السرعة. في الشكلين السابقين تبين المتجهات الممثلة بخطوط متقطعة اتجاه القوة حيث أنها تمثل التغير في السرعة.

وربما يقول المتشائم هنا أنه لا يجد ميزة في استعمال المتجهات، وإن كل ما حدث هو ترجمة حقائق معلومة لنا إلى لغة معقدة وغير عادية.

ويصعب في هذه المرحلة إقناع مثل هذا الشخص بخطأ تفكيره، وحتى الآن هو في الواقع محق في قوله، ولكننا سنرى أن نفس هذه اللغة الغريبة ستقودنا إلى تعميم مهم يستلزم وجود المتجهات.

لغز الحركة:

باقتصارنا على دراسة الحركة الخطية فقط، نبقى بعيدين عن فهم الحركات التي نراها يوميا في الحياة؛ لذلك يجب علينا بحث الحركة في مسارات منحنية، وخطوتنا التالية هي تعيين القوانين التي تحدد مثل هذه الحركة. وليس هذا بالعمل السهل. لقد أثبتت أفكارنا عن السرعة وتغيرها والقوة فائدتها العظيمة في حالة الحركة الخطية. ولكننا لا نرى على الفور كيفية تطبيق هذه الأفكار على الحركة في مسار منحن. ومن الممكن طبعا أن نتصور أن الأفكار القديمة لا تفيد في وصف الحركة العامة، وأن من اللازم إيجاد أخرى جديدة. هل سنسير في طريقنا القديم أم سنبحث عن آخر جديد؟

من العمليات التي تستخدم كثيرا في العلم عملية تعميم فكرة معينة، وطريقة التعميم نفسها ليست محددة، لأنه توجد في الغالب طرق مختلفة للقيام به، ولكن يجب أن يتحقق شرط معين: يجب أن تؤول أية فكرة بعد تعميمها إلى الفكرة الأصلية إذا توفرت الشروط الأصلية.

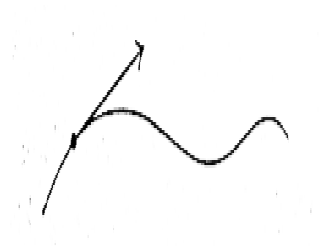
وأنسب طريقة لتوضيح ذلك هي بحث المثال الموجود بين أيدينا، يمكننا محاولة تعميم أفكارنا القديمة عن السرعة، التغير في السرعة،

القوة في حالة الحركة في مسار منحن. وعبارة المسارات المنحنية تشمل الخطوط المستقيمة فالخط المستقيم حالة خاصة وتافهة من المنحنى. وعلى ذلك إذا أدخلت فكرة السرعة، والتغير في السرعة والقوة لحالة الحركة في خط منحن فإنها تكون قد أدخلت أوتوماتيكيا للحركة في خط مستقيم ويجب ألا تتعارض هذه النتيجة مع النتائج التي حصلنا عليها سابقا. إذا أصبح المنحنى خطا مستقيما وجب أن تؤول الأفكار العامة الجديدة إلى الأفكار المألوفة التي استطعنا بواسطتها وصف الحركة الخطية. ولكن هذا الشرط لا يكفي لتعيين التعميم الوحيد المطلوب، إذ قد يستوفي هذا الشرط بأكثر من طريقة واحدة. ويبين لنا تاريخ العلم أن أبسط تعميم ممكن ينجح في بعض الأحيان ويفشل في أحيان أخرى. وتخمين طريقة التعميم الصحيحة في حالتنا الخاصة هذه بسيط للغاية. وسنجد أن الأفكار الجديدة مفيدة للغاية وأنها كما تساعد على فهم حركة حجر مقذوف في الهواء تساعد أيضا على فهم حركة الكواكب.

والآن على أي شئ تدل حالات السرعة، في: السرعة، القوة، في الحالة العامة، أي في حالة الحركة في خط منحن؟.. فلنبدأ بالسرعة، بتحرك جسم صغير جدا على المنحنى من اليسار إلى اليمين، يسمى مثل هذا الجسم الصغير في أغلب الأحيان نقطة مادية، وتبين الدائرة الصغيرة على المنحنى في الشكل السابق موضع النقطة المادية عند لحظة معينة

من الزمن. ما هي السرعة التي تناظر هذا الموضع وهذه اللحظة الزمنية؟ مرة أخرى يبين دليل جاليليو طريقة لتعريف السرعة ويجب أن نلجأ إلى الخيال من اليسار إلى اليمين تحت تأثير قوى خارجية فلنتخيل الآن أنه عند لحظة معينة وعند النقطة التي تدل عليها الدائرة الصغيرة، توقفت جميع هذه القوى عن التأثير. في الحياة العملية يستحيل علينا بالطبع أن نمنع جميع القوى الخارجية من التأثير على جسم ما ويمكننا فقط أن نقول "ماذا يحدث إذا....؟" ونحكم على صحة هذا التفكير بالنتائج التي تحصل عليها منه وباتفاق هذه النتائج مع التجربة.

يبين المتجه في الشكل التالي اتجاه الحركة المنتظمة كما نتصوره على فرض تلاشي جميع القوى الخارجية، وهو اتجاه المستقيم المسمى بالمماس، وإذا نظرنا بالميكروسكوب إلى النقطة المادية المتحركة فإننا لا نرى إلا جزءا صغيرا جدا من المنحنى، ويظهر هذا الجزء كقطعة مستقيمة صغيرة، والمماس هو امتداد هذه القطعة والمتجه المبين يمثل السرعة عند لحظة معلومة ويقع متجه السرعة على المماس. ويمثل طول هذا المتجه القيمة العددية للسرعة كما يبينها عداد السرعة في سيارة مثلا.



يجب ألا نهتم كثيرا بالتجربة المثالية التي نفترض فيها تلاشي القوة لكي نحصل على اتجاه السرعة فهي تساعدنا فقط على فهم ما يجب أن نسميه متجه السرعة وتمكننا من تعيينه عند موضع معين ولحظة معينة.

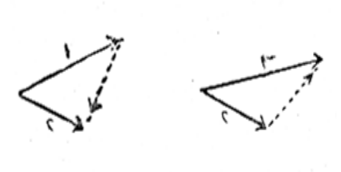
الشكل التالي يبين متجهات سرعة نقطة مادية تتحرك على منحنى عند ثلاثة مواضع مختلفة: في هذه الحالة يتغير كل من اتجاه السرعة ومقدارها (الذي يمثل بطول المتجه) أثناء الحركة.



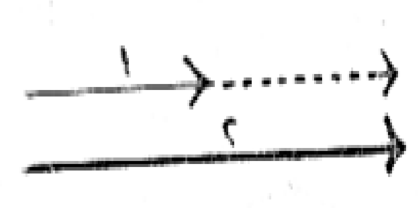
هل تحقق هذه الفكرة الجديدة عن السرعة جميع ما تتطلبه في التعميمات المختلفة؟.. أي هل تؤول هذه الفكرة إلى الفكرة المألوفة للسرعة عندما يصبح المنحنى خطا مستقيما؟.. من الواضح أنها تحقق ذلك؛ فالمماس لخط مستقيم هو المستقيم نفسه ويقع متجه السرعة على خط الحركة نفسه كما في حالة العربة المتحركة أو الكرات المتدحرجة.

وخطوتنا التالية هي إيجاد معنى التغير في سرعة نقطة مادية تتحرك في منحنى. يمكن الحصول على ذلك بطرق مختلفة، وسنختار أبسطها وأنسبها. يبين الشكل السابق عدة متجهات للسرعة تمثل الحركة عند نقط مختلفة من المسار، ويمكن – كما رأينا من قبل – رسم المتجهين الأول والثاني مرة أخرى بحيث يشتركان في نقطة الابتداء.

يسمى المتجه الممثل بالخط المنقطع "التغيير في السرعة" ونقطة الابتداء له هي نهاية المتجه الأول ونهايته



هي نهاية المتجه الثاني. ولأول وهلة قد يظهر تعريف التغير في السرعة هذا كأنه عديم المعنى ومتكلف. ويزداد وضوح هذا التعريف عندما يكون اتجاه المتجهين (١)، (٢) واحدا. ومعنى ذلك طبعا هو العودة إلى حالة الحركة في خط مستقيم. إذا كانت نقطة ابتداء المتجهين واحدة فإن المتجه المنقطع يصل بين نهايتيهما أيضا. ويصبح الرسم في هذه الحالة مطابقا للموجود في (ص ١٢) ونحصل على الفكرة القديمة كحالة خاصة من الفكرة الجديدة. وقد يكون من المفيد أن نشير هنا إلى أننا اضطررنا للفصل بين الخطين في الرسم السابق لكي لا ينطبقا ويصبح من المستحيل التفريق بينهما.



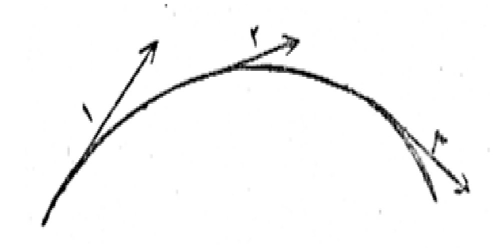
يبقى علينا الآن أن نخطو الخطوة الأخيرة في عملية التعميم هذه، وهي أهم التخمينات التي فكرنا فيها إلى الآن. يجب ربط العلاقة بين القوة والتغير في السرعة، وذلك لكي نصوغ الدليل الذي يمكننا من فهم موضوع الحركة العام.

لقد كان الدليل الذي أدى إلى شرح الحركة في خط مستقيم بسيطا. القوى الخارجية هي سبب التغير في السرعة، وإذا يكون لمتجه القوة نفس اتجاه هذا التغير. والآن ما الذي سنأخذه كدليل لشرح الحركة في منحنى؟.. نفس الشئ تماما! والفارق الوحيد هو أن لتغير السرعة الآن معنى أوسع من معناه السابق، ونظرة واحدة إلى المتجهات

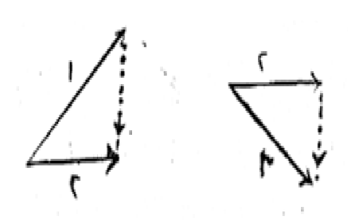
الممثلة بخطوط متقطعة في الشكلين السابقين توضح هذه النقطة تماما. إذا أعطيت السرعة عند جميع نقط المنحنى فإنه يمكننا على الفور استنتاج اتجاه القوة عند أي نقطة. ويجب رسم متجهي السرعة عند لحظتين متقاربتين جدا، وهما بذلك تناظران موضعين قريبين جدا من بعضهما. والمتجه الواصل بين نهاية المتجه الأول إلى نهاية المتجه الثاني يبين اتجاه القوة المؤثرة، ولكن من المهم جدا أن تكون الفترة الزمنية بين اللحظتين اللتين تمثل السرعة عندهما بهذين المتجهين "صغيرة جدا"، والتحليل الدقيق للعبارات التي تماثل "قريبة جدا"، "صغيرة جدا" ليس سهلا على الإطلاق. والواقع أن هذا التحليل هو الذي قاد نيوتن وليبنتز إلى اكتشاف حساب التفاضل.

إن الطريق الذي يقودنا إلى تعميم دليل جاليليو متعب للغاية، ولا يمكننا أن نبين هنا كثرة نتائج هذا التعميم وفوائد هذه النتائج. وتطبيق هذا التعميم يقودنا إلى كثير من التفسيرات البسيطة المقنعة لكثير من الحقائق التي كانت مفككة وغير مفهومة قبل ذلك.

من بين الحركات الكثيرة التي لا حصر لها سنختار أبسطها فقط، ونطبق القانون الذي وجدناه الآن في شرحها.. إذا أطلقت رصاصة من بندقية، أو قذف حجر في اتجاه مائل، أو اندفع ماء من خرطوم، فإنها جميعا ترسم مسارات متشابهة ومألوفة لنا. هذه المسارات هي قطاعات مكافئة تصور عدادا للسرعة مثبتا في حجر مثلا، وذلك لكي نتمكن من رسم متجه سرعته عند أي لحظة، والرسم التالي يبين النتيجة..



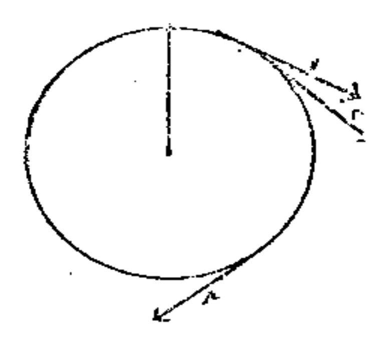
اتجاه القوة المؤثرة على الحجر هو نفس اتجاه التغير في سرعته، وقد رأينا كيف نعين هذا الأخير، والنتيجة المبينة في الرسم التالي توضح أن القوة رأسية إلى أسفل. ويحدث نفس الشئ في حالة سقوط حجر من قمة برج. المساران مختلفان وكذلك السرعتان ولكن التغير في السرعة له نفس الاتجاه، وهو نحو مركز الأرض.



إذا ربطنا حجرا في نهاية خيط وجعلناه يدور في مستو أفقي فإنه يتحرك في مسار دائري.

أطوال جميع المتجهات الموجودة في الشكل الذي يمثل هذه الحركة تكون متساوية إذا كانت القيمة العددية للسرعة ثابتة، وبالرغم من ذلك فإن السرعة ليست منتظمة لأن المسار ليس خطا مستقيما، والحركة المنتظمة في خط مستقيم هي الحركة الوحيدة الممكن حدوثها دون تأثير قوي، وفي حالتنا هذه توجد قوى مؤثرة، والذي يتغير هو اتجاه السرعة لا قيمتها وحسب قانون

الحركة يتحتم وجود قوة ما تسبب هذا التغير، وهي في هذه الحالة قوة بين الحجر وبين اليد الممسكة بالخيط.



ويطرأ السؤال الآتي على الذهن فورا: ما هو اتجاه تأثير هذه القوة؟

مرة أخرى يعطينا رسم المتجهات الجواب:

نرسم متجهي السرعة عند نقطتين قريبتين جدا، ومن ذلك نحصل على التغير في السرعة. نلاحظ أن هذا المتجه الأخير له نفس اتجاه الخيط ويكون دائما عموديا على اتجاه السرعة أي على المماس، أي أن اليد تؤثر على الحجر بقوة بواسطة الخيط.ودوران القمر حول الأرض مثال مشابه للسابق وذو أهمية كبرى، ويمكن تمثيل هذا الدوران تقريبا بحركة دائرية منتظمة. وتتجه القوة نحو الأرض لنفس السبب الذي كانت القوة من أجله موجهة نحو اليد في المثال السابق. لا يوجد خيط يصل بين القمر والأرض، ولكن يمكننا أن نتخيل خطا واصلا بين مركزي هذين الجسمين. تقع القوة على هذا الخط وتكون نحو مركز الأرض، مثلها في

ذلك مثل القوة المؤثرة على الحجر المقذوف في الهواء أو الساقط من برج.

ويمكن تلخيص جميع ما قلناه عن الحركة في جملة واحدة: القوة والتغير في السرعة متجهان لهما نفس الاتجاه. هذا هو الدليل الأول لمعضلة الحركة، ولكن من المؤكد أنه لا يكفي لتفسير جميع الحركات التي نراها تفسيرا تاما. لقد كان التحول من طريقة تفكير أرستوطاليس إلى طريقة تفكير جاليليو من أهم الأسس التي بني عليها العلم؛ فبعد هذا التحول أصبح طريق التطورات التالية واضحا، والذي يهمنا هنا هو مراحل التطور الأولى، وتتبع الأدلة الأولى وتوضيح كيف تنشأ الأفكار العلمية نتيجة للصراع العنيف مع الأفكار القديمة.

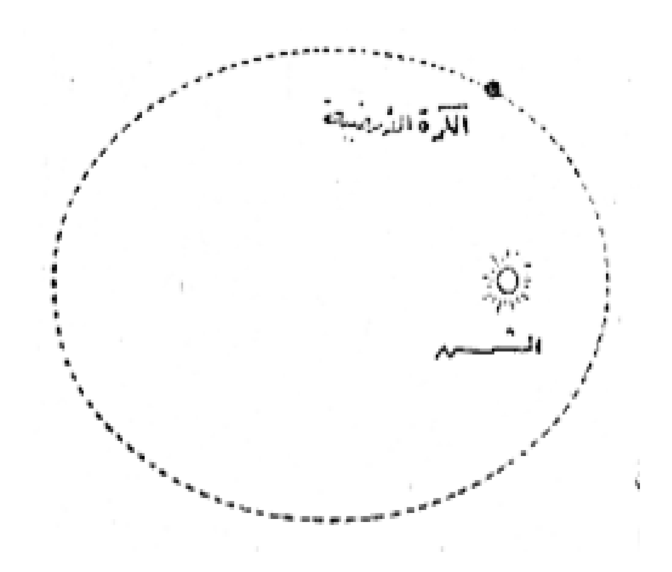
نحن نهتم هنا بالأعمال العظيمة في العلم فقط مثل إيجاد طرق جديدة وغير متوقعة للبحث ومثل مخاطرات التفكير العلمي التي تخلق صورة دائمة التغير للكون. وتكون الخطوات الأولى الأساسية ذات طابع ثوري دائما؛ فالخيال العلمي يرى أن الأفكار القديمة ضيقة ومحدودة فيغير بها أخرى جديدة، والإنتاج المستمر حول فكرة موجودة فعلا يكون دائما أقرب إلى التطور إلى أن تصل إلى مرحلة معينة فيصبح من الضروري فتح مجال جديد، ومع ذلك فلكي نفهم الأسباب والصعوبات التي تسبب تغيرا في مبادئ مهمة يجب علينا أن نعلم الأدلة الأولى وأيضا النتائج التي يمكن استخلاصها منها.

من أهم مميزات علم الطبيعة الحديث أن النتائج المستخلصة من الأدلة الأولى ليست نوعية فقط بل كمية أيضا؛ فلنعتبر مرة أخرى حالة الحجر الساقط من برج.. لقد رأينا أن سرعته تزداد بازدياد المسافة التي يسقطها ولكننا نريد أن نعلم أكثر من ذلك: ما هو مقدار التغير في السرعة؟ وما هي سرعة وموضع الحجر عند لحظة معينة بعد بدء الحركة؟ نريد أن يكون في استطاعتنا التنبؤ بما سيحدث وأن نعين بالتجربة مدى صحة هذا التنبؤ، وبالتالي مدى صحة الفروض الأولى.

وللحصول على نتائج كمية يجب استعمال لغة الرياضة. معظم أفكار العلم الأساسية بسيطة في لبها ويمكن في أغلب الأحيان التعبير عنها بلغة يفهمها الشخص العادي، وتتبع هذه الأفكار يستلزم الإلمام بطرق بحث متقدمة للغاية، ولكي نستخلص نتائج يمكن مقارنتها بما نحصل عليه من التجارب يجب استخدام علم الرياضة كوسيلة منطقية. يمكننا أن نتجنب استعمال لغة الرياضة ما دمنا لا نهتم إلا بالأفكار الطبيعية الأساسية. وحيث أننا نفعل ذلك باستمرار في هذا الكتاب، سنضطر في بعض الأحيان أن نكتفي بذكر النتائج الضرورية لفهم الأدلة المهمة التي تنشأ عن التطورات التالية دون ذكر البرهان. والثمن الذي ندفعه لتجنب لغة الرياضة هو نقص في الدقة واضطرارنا في بعض الأحيان إلى ذكر نتائج دون أن نبين كيفية الوصول إليها.

وأحد الأمثلة المهمة هو حركة الأرض حول الشمس، من المعلوم أن المسار هو منحنى مقفل يسمى قطع ناقص.. برسم شكل يبين

متجهات التغير في السرعة، نرى أن اتجاه القوة المؤثرة على الأرض هو نحو الشمس. ولكن هذه المعلومات ليست كاملة مطلقا فنحن نود أن يكون في استطاعتنا أن نعلم موضع الأرض والكواكب الأخرى عند أي وقت، ونود أيضا أن يكون في استطاعتنا التنبؤ بوقت حدوث وفترة استمرار الكسوف الشمسي التالي وبكثير من الظواهر الفلكية الأخرى.



إن هذا ممكن، ولكن ليس على أساس الدليل الأول فقط لأنه يتحتم للحصول على المعلومات السابقة معرفة اتجاه القوة، وأيضا قيمتها المطلقة أي مقدارها. ونيوتن هو الذي اتجه الاتجاه الصحيح عند هذه النقطة. وقد كان عمله عظيما حقا؛ فحسب قانون الجاذبية المنسوب له ترتبط قوة الجذب بين جسمين ارتباطا بسيطا بالبعد بينهما. وتصغر القوة عندما يزداد هذا البعد.

ولكي نكون أكثر دقة نقول أن القوة تصغر إلى ١\٢ * ١\٢ = ١\٤ قيمتها عندما يتضاعف البعد ، وإلى ١\٣ * ١\٣ = ١\٢ قيمتها عندما يزداد البعد إلى ثلاثة أمثاله.

على ذلك نرى أنه يمكن في حالة قوة الجذب التعبير ببساطة عن الارتباط بين القوة وبين البعد بين الجسمين المتحركين.

نتبع نفس الطريقة في جميع الحالات الأخرى التي تؤثر فيها قوى أخرى مختلفة مثل القوى المغناطيسية والكهربائية وما شابهها، ونحاول أن نعبر بصيغة بسيطة عن القوة ولا نكون محقين في التعبير عن القوة بهذه الصيغة إلا إذا حققنا النتائج المستخلصة منها بالتجربة. ولكن معرفة قوة الجذب وحدها لا تكفي لتعيين حركة الكواكب: لقد رأينا أن المتجهين اللذين يمثلان القوة وتغير السرعة في فترة زمنية قصير يكونان في نفس الاتجاه. يجب الآن أن تتبع نيوتن ونخطو خطوة أخرى فتفترض علاقة بسيطة بين طولي هذين المتجهين، تحت نفس الشروط السابقة، أي إذا اعتبرنا حركة نفس الجسم في فترات صغيرة من الزمن فرأى نيوتن أن التغير في السرعة سيتناسب مع القوة. أي أنه يلزم تخمين فكرتين مكملتين لبعضهما للحصول على نتائج كمية لحركة الكواكب.

الفكرة الأولى عامة وهي تعطي العلاقة بين القوة والتغير في السرعة، والثانية خاصة وهي تحدد بالضبط العلاقة بين القوة المؤثرة المعينة وبين البعد بين الجسمين . والفكرة الأولى هي قانون الحركة

لنيوتن والثانية هي قانون الجاذبية له أيضا. والفكرتان معا تعينان الحركة تماما. ويتضح ذلك من المنطق التالي الذي قد يبدو غامضا بعض الشيئ. نفرض أننا عند لحظة معينة نعلم موضع وسرعة كوكب وأيضا القوة المؤثرة عليه. باستعمال قوانين نيوتن نستطيع أن نعين التغير في السرعة في فترة زمنية قصيرة. وحيث أننا نعلم الآن السرعة الابتدائية ونغيرها، يكون في استطاعتنا تعيين موضع وسرعة الكواكب في نهاية الفترة الزمنية. بالتكرار المستمر لهذه العملية، يمكن الحصول على المسار الكامل للكوكب دون الحاجة إلى أية إحصائيات أخرى من التي نحصل عليها بالمشاهدة، وهذه هي الطريقة النظرية التي تستطيع الميكانيكا بواسطتها أن تتنبأ بسير جسم متحرك، ولكن يصعب تطبيق هذه الطريقة عمليا؛ ففي الواقع تكون هذه الطريقة متعبة للغاية وغير دقيقة. ومن حسن الحظ أننا غير مضطرين لاستعمال هذه الطريقة، فعلم الرياضة يهيئ طريقا أقصر يمكننا من وصف الحركة وصفا دقيقا والمجهود المستعمل الذي يبذل في ذلك يكون أقل بكثير من المجهود الذي يبذل في كتابة جملة واحدة، ويمكن التأكد من صحة أو خطأ النتائج التي يحصل عليها من هذا الطريق بالمشاهدة.

القوة التي نلاحظها في حركة الحجر الساقط في الهواء والقوة التي نلاحظها في دوران القمر في مساره هما قوتان من نوع واحد ألا وهو جذب الأرض للأجسام المادية. ولقد أدرك نيوتن أن حركة الأحجار الساقطة وحركة القمر والكواكب ليست إلا ظواهر خاصة لقوة جذب عامة تؤثر بين أي جسمين. في الحالات المعقدة التي تشمل تأثير

أجسام كثيرة على بعضها فلا يكون من السهل وصف الحركة رياضيا، ولكن تبقى القواعد الأساسية بدون تغير.

نرى الآن أن النتائج التي توصلنا إليها يتتبع الأدلة الأولى صحيحة في حالة حركة الحجر المقذوف وفي حالة حركة القمر والأرض والكواكب، والذي يجب اختبار صحته بالتجربة العملية هو طريقتنا في التفكير جميعها. ولا يمكن اختبار صحة أي من الفروض على حدة. ولقد نجحت قوانين الميكانيكا هذه نجاحا باهرا في تفسير حركة الكواكب حول الشمس، ومع ذلك فقد توجد قوانين أخرى مبنية على فروض مختلفة وتنجح أيضا في تفسير ذلك.

إن نظريات علم الطبيعة هي ابتكارات حرة للعقل البشري وليست كما قد يظهر، وحيدة ومحدودة تماما بالعالم الخارجي، ونحن في محاولتنا فهم الحقيقة تشبه رجلا يحاول فهم تركيب ساعة مغلقة. وهو يرى وجهها وعقاربها المتحركة ويسمع أيضا دقاتها ولكنه لا يستطيع فتح صندوقها. وإذا كان الرجل عبقريا فإنه قد يستطيع أن يكون صورة ما لتركب قد يسبب جميع ما يشاهده، ولكنه لن يكون بحال من الأحوال متأكدا من أن هذا هو التركيب الوحيد الذي يسبب مشاهداته ويستحيل عليه أيضا أن يقارن الصورة التي كونها لنفسه بالتركيب الحقيقي، بل أنه ليتعذر عليه أن يتخيل إمكان أو معنى هذه المقارنة. ولكن من المؤكد أنه يعتقد أنه كلما زاد من معلوماته كلما أصبحت الصورة التي يكونها عن الواقع بسيطة، وكلما فسرت هذه الصورة عددا أكبر من مشاهداته. كما

أنه يعتقد في وجود النهاية المثالية للمعرفة وفي اقتراب العقل البشري منها. وربما أطلق على هذه النهاية المثالية لفظ "الحقيقة الموضوعية".

يبقى دليل آخر:

يهيأ للإنسان عند البدء في دراسة الميكانيكا، أن كل شيئ في هذا الفرع من العلوم بسيط، وأن مجال البحث فيه قد انتهى، ويندر أن يفكر الإنسان في وجود دليل مهم لم يلاحظه أحد لمدة ثلاثة قرون. ويرتبط هذا الدليل الذي عانى الإهمال بإحدى الأسس المهمة في الميكانيكا – الكتلة.

سنعود مرة أخرى إلى تجربتنا المثالية البسيطة، حركة عربة على طريق أملس تماما. إذا كانت العربة ساكنة عند بدء الحركة ثم دفعت فإنها تتحرك بعد ذلك بسرعة منتظمة معينة. نفرض الآن أن من الممكن إعادة هذه العملية بحذافيرها أي عدد مطلوب من المرات بحيث تؤثر نفس القوة في نفس الاتجاه على نفس العربة، مهما كان عدد مرات تكرار هذه التجربة فإننا نحصل دائما على نفس السرعة النهائية. ماذا يحدث لو أننا غيرنا التجربة؟ أي ماذا يحدث مثلا لو أن العربة كانت فارغة في التجربة الأولى ومحملة في الثانية؟.. تكون السرعة النهائية للعربة المحملة أقل من السرعة النهائية للعربة الفارغة. من ذلك نستنتج أنه إذا أثرت قوة واحدة على جسمين مختلفي الكتلة فحركتهما من حالة

السكون فإن سرعتيهما الناتجتين لا تكونا متساويتين، أي أن السرعة تتوقف على كتلة الجسم، وتكون السرعة أقل إذا كانت الكتلة أكبر.

على ذلك نستطيع – ولو نظريا – أن نعين كتلة جسم ما، أي بعبارة أدق نستطيع أن نعين النسبة بين كتلة جسم ما وكتلة جسم آخر؛ فإذا كان لدينا قوتان متساويتان تؤثران على كتلتين ساكنتين، ووجدنا أن سرعة الكتلة الأولى بعد التأثير تساوي ثلاثة أضعاف سرعة الكتلة الثانية؛ فإننا نستنتج أن الكتلة الأولى تساوي ثلث الكتلة الثانية. وطبعا ليست هذه بطريقة عملية لتعيين النسبة بين كتلتين. ومع ذلك فيمكننا أن نتخيل أننا قد تمكّنا من تعيين هذه النسبة إما بهذه الوسيلة أو بأية وسيلة أخرى مبنية على قانون القصور الذاتي.

كيف نقدر الكتل في الحياة العملية؟.. طبعا ليس بالطريقة التي ذكرناها فيما سبق، كل شخص يعرف الإجابة الصحيحة لهذا السؤال، فنحن نقدر الكتل بوزنها على ميزان. دعنا نبحث بالتفصيل الطريقتين المختلفتين لتعيين الكتلة.

لا توجد أية علاقة بين التجربة الأولى وبين الجاذبية الأرضية بالعربة تتحرك بعد الدفع على مستو أفقي أملس. وقوة الجاذبية التي تسبب بقاء العربة على المستوى تبقى ثابتة ولا تدخل مطلقا في تعيين الكتلة. أما حالة الوزن فتختلف عن ذلك. يستحيل علينا استعمال الميزان إذا لم تجذب الأرض الأجسام، أي إذا لم توجد قوة الجاذبية. الفرق بين

طريقتي تعيين الكتلة هو أنه لا علاقة للأولى بقوة الجاذبية بينما أساس الثانية هو وجود هذه القوة.

ونتساءل الآن: هل نحصل على نفس النتيجة إذا عينا النسبة بين الكتلتين بكل من الطريقتين السابقتين؟.. وتعطينا التجارب إجابة صريحة على هذا السؤال. النتيجة هي نفسها بالضبط في الحالتين! وهذه النتيجة التي كان من المستحيل التنبؤ بها مبنية على المشاهدة لا على المنطق. دعنا لغرض التبسيط نسمي الكتلة المعينة بالتجربة الأولى كتلة القصور الذاتي أو الكتلة القاصرة، والأخرى المعينة بالتجربة الثانية كتلة الجاذبية. هاتان الكتلتان متساويتان في الكون الذي نعيش فيه ولكن يمكننا أن نتصور إمكان عدم تساويهما..

وينشأ السؤال الآخر الآتي فورا: هل تساوي هاتين الكتلتين مجرد صدفة أم له مغزى أعمق من ذلك؟ يجيب علم الطبيعة الكلاسيكي على هذا السؤال كما يأتي: تساوي هاتين الكتلتين مجرد مصادفة ولا يوجد أي مغزى له، أما إجابة علم الطبيعة الحديث فعكس ذلك تماما: تساوي هاتين الكتلتين شئ أساسي يكون دليلا مهما يؤدي إلى فهم أعمق للموضوع. ولقد كان هذا الدليل في الواقع أحد الأدلة عظيمة الأهمية التي أدت إلى تكوين النظرية المسماة بالنظرية النسبية العامة.

تبدو القصص البوليسية تافهة إذا فسرت فيها الأحداث الغريبة كمصادفات، وتكون القصة شيقة أكثر إذا تبعث حوادثها نظاما معينا.

بنفس الطريقة تكون النظرية التي تفسر تساوي كتلتي الجاذبية والقصور الذاتي تبز النظرية التي تجعل من هذا التساوي مصادفة بحتة، على شرط أن تكون كل من النظريتين متفقة مع الحقائق المشاهدة.

حيث أن تساوي كتلتي التثاقل والقصور الذاتي كان ضروريا لتكوين النظرية النسبية، فإنه يحق لنا أن نبحثه هنا بتعمق. ما هي التجارب التي تقنعنا بأن الكتلتين متساويتان؟.. والإجابة هي تجربة جاليليو القديمة. في هذه التجربة ألقى جاليليو كتلا مختلفة من برج فلاحظ أن الزمن اللازم لسقوط كل منها كان واحدا؛ أي أن حركة الجسم الساقط لا تتوقف على كتلته. لربط هذه النتيجة العملية البسيطة ذات الأهمية البالغة بتساوي الكتلتين نحتاج إلى منطق معقد.

يتحرك جسم ساكن نتيجة لتأثير قوة خارجية ويكتسب بذلك سرعة معينة، وتتوقف سرعته على كتلة قصوره الذاتي فمقاومته للحركة تكون أكبر إذا كانت كتلته أكبر. ويمكننا أن نقول دون أن ندعي الدقة: يتوقف تأثير القوى الخارجية على جسم ما على كتلة قصوره الذاتي. إذا كانت الأرض تجذب جميع الأجسام بقوى متساوية، فلا بد أن يكون سقوط الأجسام التي كتلة قصورها الذاتي كبيرة أبطأ من سقوط الأجسام التي كتلة قصورها الذاتي صغيرة. ولكن الحالة تختلف عن ذلك: جميع الأجسام تسقط بنفس الطريقة. وعلى ذلك يتحتم أن تكون قوة جذب الأرض للكتل المختلفة مختلفة. ولكن الأرض تجذب الأجسام بقوة الجاذبية ولا توجد لها أية علاقة بكتلة القصور الذاتي. والقوة التي

نسميها قوة جذب الأرض تتوقف على كتلة الجاذبية، ولكن حركة الحجر الناتجة تتوقف على كتلة القصور الذاتي. وحيث أن هذه الحركة الناتجة عن قوة الجاذبية واحدة دائما (جميع الأحجار الساقطة من نفس الارتفاع تقسط بنفس الطريقة)، على ذلك يتحتم أن تكون كتلة الجاذبية هي نفس كتلة القصور الذاتي. وقد يصوغ عالم الطبيعة القانون السابق في الصيغة الغامضة الآتية: "تزداد عجلة الجسم الساقط بازدياد كتلة جاذبيته وتتناسب معها، وتتناقص بتناقص كتلة قصوره الذاتي وتتناسب معها. وحيث أن جميع الأجسام الساقطة لها نفس العجلة فيتحتم أن تتساوى الكتلتان".

في قصتنا الغامضة لا توجد مسائل حلت حلا كاملا، وانتهي منها إلى الأبد؛ فبعد ثلاثمائة عام اضطررنا أن نعود إلى مسألة الحركة الأولية، وذلك لنراجع طريقة البحث، ولنجد أدلة كنا قد أهملناها، بذلك حصلنا على صورة مختلفة للكون المحيط بنا.

نظرية السيّال للحرارة :

سنبدأ هنا في تتبع دليل جديد ينشأ عن ظواهر الحرارة، ومع ذلك فمن المتعذر تقسيم العلم إلى أقسام متفرقة لا علاقة بينها. والواقع أننا سنجد أن المبادئ التي سنبحثها هنا وتلك التي درسناها فعلا والتي سندرسها فيما بعد تكون جميعها شبكة متداخلة. وفي كثير من الأحيان يمكن تطبيق طريقة بحث فرع معين من فروع العلم عند بحث فروع

أخرى مختلفة. وفي الغالب تعدل النظريات الأولى بحيث تفيد في فهم كل من الظواهر الأصلية التي نشأت منها هذه المبادئ والظواهر الجديدة التي تطبق عليها هذه النظريات الآن.

والمبادئ الأساسية التي تلزم لوصف الظواهر الحرارية هي الحرارة ودرجة الحرارة، ولقد استغرق التمييز بين هذين المبدأين زمنا طويلا في تاريخ العلم يصعب تصديقه، ولكن سار التقدم بخطى واسعة بعد هذا التمييز. سنبحث هذين المبدأين ونوضح الفرق بينهما رغم أنهما الآن شيئان مألوفان لكل إنسان.

نستطيع بحاسة اللمس أن نميز الأجسام الساخنة والباردة، ولكن هذا اختبار نوعي فقط لا يكفي لوصف كمي، بل أنه يجلب الغموض في بعض الأحيان. ويمكن ملاحظة ذلك بتجربة بسيطة مشهورة. نفرض أن لدينا ثلاثة أوان يحتوي الأول على ماء بارد، والثاني على ماء فاتر، والأخير على ماء ساخن. إذا غمسنا إحدى اليدين في الماء البارد والأخرى في الساخن فإننا نحصل على رسالة من الأولى تنبئ بالبرودة ورسالة من الثانية تنبئ بالسخونة.. إذا غمسنا بعد ذلك اليدين معا نفس الماء الفاتر فإننا نحصل على رسالتين متناقضتين واحدة من كل يد.

لنفس السبب كان رأي أحد رجال الإسكيمو في جو نيويورك في الربيع مختلفا عن رأي أحد سكان المناطق الحارة، فالأول يعتقد أنه حار والثاني يظن أنه بارد. نتخلص من هذه المشكلات بواسطة الترمومتر،

وهو آلة صممها جاليليو في صورة بدائية – هنا أيضا يقابلنا هذا الاسم المشهور! – ويعتمد استعمال الترمومتر على بعض الفروض الطبيعية الواضحة التي نتذكرها باقتباس أسطر قليلة من محاضرات ألقاها بلاك منذ أكثر من مائة وخمسين عاما، وبلاك هو الرجل الذي ساهم بمجهود كبير في التغلب على الصعوبات المتعلقة بفكرتي الحرارة ودرجتها.

"إذا أخذنا ألفا أو أكثر من أنواع المادة المختلفة مثل المعادن والأحجار والأملاح والريش والصوف والماء وغيره من الموائع، وكانت هذه الأشياء ذات حرارات مختلفة مبدئيا، ثم وضعناها جميعا في حجرة واحدة لا توجد فيها مدفأة ولا تدخلها الشمس فإن الحرارة تنتقل من الأجسام الساخنة إلى الأجسام الباردة، وقد يستغرق ذلك مدة ساعات أو يوما، وإذا استعملنا ترمومترا في نهاية هذه الفترة ووضعناها على كل من هذه الأجسام فإنه يشير دائما إلى نفس الدرجة".. وحسب التسمية الحديثة يلزم تغيير الجملة ذات حرارات مختلفة إلى ذات درجات حرارة مختلفة.

وقد يفكر الطبيب الذي يأخذ الترمومتر من فم رجل مريض كما يأتي: يبين الترمومتر درجة حرارة نفسه بواسطة طول عموده الزئبقي. سنفرض أن طول عمود الزئبق يزداد بالتناسب مع زيادة درجة الحرارة. ولكن الترمومتر يبقى ملامسا للمريض الذي أعالجه عدة دقائق، فتكون درجة حرارة الترمومتر هي نفس درجة حرارة المريض. وعلى ذلك أستنتج أن درجة حرارة هذا المريض هي التي يسجلها الترموتر، وربما كان

الطبيب يعمل بطريقة ميكانيكية، ولكنه في الواقع يطبق نظريات طبيعية دون أن يفكر فيها.

ولكن هل يحتوي الترمومتر على نفس مقدر الحرارة الموجودة في جسم الرجل؟ طبعا لا. إن اقتراحنا أن الجسمين يحتويان على نفس الكمية من الحرارة نتيجة لتساوي درجتي حرارتهما يكون، كما أشار بلاك: رأيا متسرعا في الموضوع، ومعنى ذلك أننا نمزج بين كمية الحرارة الموجودة في جسم وبين شدة هذه الحرارة رغم وضوح أنهما شيئان مختلفان يجب التمييز بينهما عند التفكير في توزيع الحرارة.

يمكننا فهم هذا التمييز بواسطة تجربة بسيطة للغاية، إذا وضعنا رطلا من الماء فوق لهب الغاز فإن درجة حرارته تتغير من درجة حرارة الحجرة إلى درجة الغليان بعد فترة معينة من الزمن. وإذا استبدلنا هذا الرطل باثني عشر رطلا من الماء أو أكثر ووضعناها في نفس الإناء وفوق نفس اللهب فإنها تستغرق وقتا أطول بكثير من الفقرة السابقة لكي تصل إلى درجة الغليان. هذه التجربة تبين أنه يلزم في الحالة الأخيرة كمية أكبر من "شئ ما" ويسمى هذا "الشئ" حرارة.

ونحصل على مبدأ آخر – الحرارة النوعية – من التجربة الآتية: إذا احتوى إناء على رطل من الماء، وإناء آخر على رطل من الزئبق وسخن الإناءان بنفس الطريقة؛ فإننا نلاحظ أن الزئبق يسخن بسرعة تفوق بكثير السرعة التي يسخن بها الماء أي أن "الحرارة" اللازمة لرفع درجة حرارة

الزئبق درجة واحدة أقل من الحرارة اللازمة لرفع درجة حرارة الماء درجة واحدة أيضا، وعلى العموم تلزم كميات مختلفة من "الحرارة" لتغير درجة حرارة الكتل المتساوية من المواد المختلفة (مثل: الماء والزئبق والحديد والنحاس والخشب.. الخ)، درجة واحدة (من ٤٠ إلى ٤١ فهرنهيت مثلا).. ونعبر عن ذلك فنقول أن لكل مادة سعتها الحرارية أو حرارتها النوعية الخاصة بها..

ما دمنا قد توصلنا إلى فهم فكرة الحرارة، فإنه يمكننا أن نبحث في طبيعتها بالتفصيل.. لدينا جسمان الأول ساخن والآخر بارد، أو بعبارة أخرى: درجة حرارة الأول أعلى من درجة حرارة الثاني. نزيل جميع المؤثرات الخارجية ونجعل هذين الجسمين يتلامسان. نعلم أن الجسمين يصلان إلى نفس درجة الحرارة بعد مضي فترة من الزمن. ولكن كيف يتم ذلك؟ ماذا يحدث بين اللحظة التي يبدأ فيها التلامس بينهما وبين اللحظة التي تتساوى فيها درجتا الحرارة؟.. يمكننا أن نتصور أن الحرارة "تنساب" من جسم لآخر كما ينساب الماء من مستو مرتفع إلى مستو منخفض، ورغم بساطة هذه الفكرة فإنها تتفق مع كثير من الحقائق، ويكون التناظر كما يأتي:

الماء	الحرارة
المستوى المرتفع	درجة الحرارة العالية
المستوى المنخفض	درجة الحرارة المنخفضة

ويستمر الانسياب إلى أن يصبح الارتفاعان – أي درجتا الحرارة – متساويين، ويمكن بالبحث الكمي الاستفادة من وجهة النظر البدائية هذه. إذ خلطت كتلة معينة من الماء ذات درجة حرارة معلومة بكتلة أخرى معينة من الكحول في درجة حرارة أخرى (لا تساوي درجة حرارة الماء) فمن الممكن الحصول على درجة الحرارة النهائية للمخلوط إذا علمت الحرارة النوعية لكل من الماء والكحول وبالعكس، إذا علمت درجة حرارة المخلوط النهائية يمكن بعد قليل من العمليات الجبرية الحصول على النسبة بين الحرارتين النوعيتين.

نتبين وجود أوجه شبه بين المبادئ المتعلقة بالحرارة التي ندرسها الآن وبين المبادئ الطبيعية الأخرى؛ فالحرارة من وجهة نظرنا هي جسم سيال كالكتلة في الميكانيكا، وقد تتغير كمية الحرارة أو قد تبقى ثابتة، مثل المال يمكن إنفاقه كما يمكن حفظه في خزانة، وكما أن مقدار المال الموجود في خزانة لا يتغير ما دامت هذه الخزانة مقفلة فإن مقدار كل من الكتلة والحرارة في جسم معزول يبقى ثابتا. وزجاجة الترموس المثالية تناظر هذه الخزانة، وزيادة على ذلك، لا يضيع شيئ من الحرارة حتى لو انسابت من جسم لآخر مثلها في ذلك مثل كتلة مجموعة منعزلة لا تتغير حتى ولو عانت تحويلا كيميائيا، وحتى لو استعملت الحرارة في إذابة الثلج مثلا أو في تحويل الماء إلى بخار بدلا من استعمالها في رفع درجة حرارة جسم فإننا نستمر في التفكير على أنها جسم سيال، وأن من الممكن الحصول عليها ثانية بأكملها بتحويل الماء إلى ثلج أو بتحويل البخار إلى ماء والأسماك القديمة مثل حرارة الانصهار الكامنة، حرارة

التبخير الكامنة، تبين أن هذه الأسس نشأت من التفكير في الحرارة كشيئ ذي كيان والحرارة الكامنة هي حرارة مختفية مؤقتا مثل المال المحفوظ في خزينة الذي يمكن الحصول عليه واستعماله إذا علمت كيفية فتح الخزينة.

ولكن من المؤكد أن كيان الحرارة يختلف عن كيان الكتلة. يمكننا أن نستدل على الكتل بواسطة الموازين، ولكن هل للحرارة وزن؟ هل يكون وزن قطعة حديد ساخنة إلى درجة الاحمرار أكبر من وزنها وهي باردة كالثلج؟ تدلنا التجربة على أن قطعة الحديد لها نفس الوزن في الحالتين. إذا كانت الحرارة شيئا فإنه شيء لا وزن له، وقد جرت العادة في الماضي على تسمية الحرارة "كالوريك"، وهي أول ما عرف من مجموعة الأشياء التي لا وزن لها. وستسنح لنا فرصة فيما بعد لكي تتبع تاريخ هذه المجموعة ودراسة كيفية ظهورها وتلاشيها، ونكتفي الآن بملاحظة مولد هذا العضو الخاص من هذه المجموعة.

الغرض من أية نظرية طبيعية هو تفسير أكبر مدى ممكن من الظواهر، ويبرر وجود نظرية ما مقدرتها على تفسير الحوادث وجعلها مفهومة. لقد رأينا أن نظرية السيال للحرارة تفسير كثيرا من الظواهر الحرارية، ومع ذلك سيظهر في القريب العاجل أن هذا ليس إلا دليلا زائفا، وأن من المستحيل اعتبار الحرارة شيئا سيالا، حتى ولو كان هذا الشئ عديم الوزن، ويتضح ذلك من الرجوع إلى بعض التجارب البسيطة التي ميزت بدء الحضارة.

المادة لا يمكن الحصول عليها من اللاشئ ولا يمكن إضاعتها، ولكن الإنسان الأول ولد النار بالاحتكاك وأحرق بها الخشب. وأمثلة التسخين بواسطة الاحتكاك كثيرة جدا ومألوفة بدرجة تغني عن ذكرها. في جميع هذه الحالات تتولد كمية من الحرارة وهي حقيقة يصعب تعليلها بنظرية السيال، وقد يحاول مؤيدو هذه النظرية تعليل هذه الظاهرة وقد تكون محاولتهم كما يأتي: "يمكن بواسطة نظرية السيال تفسير تولد هذه الحرارة. لنعتبر مثالا بسيطا، حالة دلك قطعة من الخشب بقطعة أخرى منه. الدلك هو شئ يؤثر في الخشب ويغير خواصه، ومن الجائز جدا أن تتعدل هذه الخواص بحيث تنتج درجة حرارة أعلى دون أن تتغير كمية الحرارة نفسها، ونحن لا نشاهد إلا تغيرا في درجة الحرارة. من الجائز أن الاحتكاك بغير الحرارة النوعية للخشب ولا يؤثر على كمية الحرارة الكلية".

ولا توجد أية فائدة ترجى من مناقشة مؤيدي نظرية السيال في هذه المرحلة، وذلك لأنه لا يمكن جسم هذه المسألة إلا بالتجربة. نفرض أن قطعتين من الخشب متساويتان من جميع الوجوه ولنتصور أن تغييرا متساويا قد اعترى درجة حرارتهما بطريقتين مختلفتين، في الأولى بالاحتكاك وفي الثانية بملامسة جسم ساخن مثلا. إذا كانت الحرارة النوعية لكل من قطعتي الخشب واحدة في درجة الحرارة الجديدة فلا يوجد أي أساس لنظرية السيال.. هناك طرق بسيطة للغاية لتعيين الحرارة النوعية، ويتوقف مصير النظرية على نتيجة قياس الحرارتين النوعيتين السابقتين. وتتكرر الاختبارات التي تستطيع أن تصدر حكما بالحياة أو

الموت على نظرية ما كثيرا في تاريخ علم الطبيعة، وهي تسمى تجارب حاسمة. والذي يقرر إذا كانت التجربة حاسمة أم لا هو صيغة السؤال نفسه، ولا يمكن اختيار أكثر من نظرية واحدة بتجربة واحدة من هذا النوع. والتجربة التي نعين فيها الحرارة النوعية لجسمين من نوع واحد وصلا إلى نفس درجة الحرارة الأول بالاحتكاك، والثاني بانسياب الحرارة إليه من جسم آخر هي مثال على هذا النوع من التجارب الحاسمة. وقد أجرى رمفورد هذه التجربة منذ حوالي مائة وخمسين عاما وبذلك قضي نهائيا على نظرية السيال للحرارة.

ويقص رمفورد قصته فيقول:

"كثيرا ما يحدث في الحياة العملية العادية أن تسنح فرص لدراسة الأمور الطبيعية الغريبة، وقد تجرى كثير من التجارب الفلسفية المهمة دون مشقة أو تكاليف وذلك باستخدام الألات التي صممت لاستعمالها في الفنون والصناعات.. وكثيرا ما سنحت لي شخصيا الفرصة بمشاهدة ذلك، وأنا مقتنع بأن الملاحظة الدقيقة لكل ما يجرى في الحياة العملية تؤدي إلى أسئلة مفيدة وإلى طرق للبحث والتحسين أكثر من التي يحصل عليها الفلاسفة في الساعات الطويلة المخصصة لدراساتهم المركزة، وقد يظهر أننا نحصل على هذه النتائج بمجرد الصدفة أو نتيجة للتخيلات التي ينتبه فيها العقل نتيجة لما اعتاد الإنسان مشاهدته.

وبينما كنت أشرف منذ فترة وجيزة على صناعة المدفأة في المصانع الحربية بميونيخ، أثارت انتباهي درجة الحرارة العالية التي تصل إليها بندقية من البرونز في وقت قصير أثناء حفرها، وأيضا الحرارة الشديدة (أعلى بكثير جدا من درجة حرارة الماء المغلي كما وجدت بالتجربة) لشظايا المعدن المتطايرة منها بواسطة المثقاب. من أين تأتي هذه الحرارة التي تظهر في العملية الميكانيكية السابقة؟.. هل تنشأ من شظايا المعدن المنفصلة بواسطة المثقاب من كتلة المعدن الصلبة؟ إذا كان هذا هو الواقع. فحسب النظرية الحديثة للحرارة الكامنة ونظرية السيال للحرارة يجب أن تتغير الحرارة النوعية، ويجب أن يكون التغيير كبيرا بدرجة تعلل وجود كل هذه الحرارة. والواقع أنه لم يحدث أي تغيير، فقد أخذت كميتين متساويتين من هذه القطع المتطايرة ومن شرائح مصقولة من نفس كتلة المعدن بمنشار دقيق ورفعتها إلى درجة حرارة واحدة (درجة حرارة غليان الماء) ووضعتهما في كميتين متساويتين من الماء البارد (درجة حرارته ٥٩.٥ ف) فلم نلاحظ أي اختلاف بين درجة حرارة الماء الذي وضعت فيه القطعة المتطايرة ودرجة حرارة الماء الذي وضعت فيه شرائح المعدن".

وأخيرا وصل إلى النتيجة الآتية: "وعند البحث في هذا الموضوع يجب أن نتذكر أن منبع الحرارة التي ظهرت بالاحتكاك في التجارب السابقة يظهر كأن من المستحيل استنفاده. ومن الواضح أن الشيئ الذي يمكن لجسم معزول، أو لمجموعة منعزلة من الأجسام الاستمرار في منحه دون حد يمكن أن يكون شيئا ماديا. ويظهر لي أن من الصعب جدا

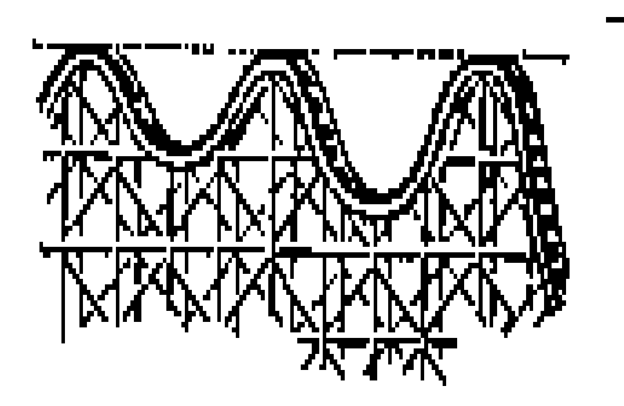
إن لم يكن من المستحيل تكوين فكرة واضحة لأي شئ يمكن إيجاده ونقله بنفس الطريقة التي توجد وتنقل بها الحرارة في هذه التجارب، إلا إذا كان هذا الشيئ هو الحركة".

بذلك نرى انهيار النظرية القديمة، أو بعبارة أدق نرى أن نظرية السيال لا يمكن تطبيقها إلا على مسائل انسياب الحرارة، ويجب علينا الآن (كما لاحظ رمفورد) أن نبحث عن دليل جديد. من أجل ذلك سنترك موضوع الحرارة مؤقتا ونعود إلى الميكانيكا.

عربة الملاهي:

تعال بنا الآن نتتبع حركة تلك الملهاة الشعبية المسماة بـ "عربة الملاهي" ترفع عربة صغيرة أو تدفع إلى أعلى موضع في مسار متموج، وعند تركها حرة تبدأ في الدحرجة تحت تأثير قوة الجاذبية الأرضية فتأخذ في الارتفاع والانخفاض على خط منحن شديد الانحدار يتغير اتجاهه بكثرة، ويجد الراكب في ذلك لذة كبيرة نتيجة للتغيرات المفاجئة في السرعة. وأثناء الحركة جميعها لا تصل العربة مطلقا إلى نفس الارتفاع الابتدائي ويصعب وصف الحركة وصفا كاملا، ففضلا عن الجانب الميكانيكي من المسألة، أي التغيير في السرعة والموضع بمضي الزمن، يوجد الاحتكاك الذي يولد الحرارة على القضبان والعجلات. والمغزى الوحيد لتقسيم هذه العملية الطبيعية إلى هاتين الوجهتين هو التمكن من استعمال المبادئ التي درسناها فيما سبق. ويؤدي هذا التقسيم إلى تجربة

مثالية، إذ أنه من الممكن أن نتخيل العملية الطبيعية التي لا يظهر فيها إلا الجانب الميكانيكي، ولكن يستحيل تحقيقها عمليا.



للحصول على هذه التجربة المثالية، نتصور أن أحد الأشخاص تمكن من التخلص تماما من الاحتكاك الذي يصاحب الحركة باستمرار، وأن هذا الشخص قرر أن يطبق اكتشافه على تصميم "عربة ملاهي". يجب أن يعلم هذا الشخص كيف يصمم مثل هذه العربة. ستسير العربة إلى أعلى وإلى أسفل مبتدئة من نقطة على ارتفاع مائة قدم عن سطح الأرض مثلا. يكتشف الرجل بعد وقت قصير من التجربة – ومن الخطأ – أنه يتحتم عليه اتباع قاعدة بسيطة للغاية. يستطيع أن يبني الطريق كما يشاء بشرط أن تكون نقطة الابتداء هي أعلى نقطة فيه، وإذا كانت العربة ستتحرك حركة حرة إلى نهاية المسار، يمكن للمهندس أن يجعلها ترفع إلى مائة قدم أي عدد من المرات، ولكن يتحتم ألا تتعدى العربة هذا الارتفاع. وفي المسار الحقيقي يستحيل على العربة أن تصل إلى ارتفاعها

الابتدائي، وذلك لوجود الاحتكاك، ولكن يمكن إهمال ذلك في هذه التجربة المثالية.

تبدأ العربة في التدحرج من النقطة الأصلية. ينقص ارتفاع العربة عن سطح الأرض كلما تحركت بينما تزداد سرعتها. وقد تذكرنا هذه الجملة الأخيرة لأول وهلة بجملة في أحد دروس اللغة: "لا يوجد معي قلم ولكن يوجد معك ستة برتقالات"، ولكن جملتنا ليست بهذه السخافة. لا توجد أية علاقة بين عدم وجود قلم معي وبين وجود ست برتقالات معك، ولكن يوجد ارتباط واقعي بين ارتفاع العربة عن سطح الأرض وبين قيمة سرعتها. ويمكننا إيجاد قيمة سرعة العربة في أية لحظة إذا علم ارتفاعها عن سطح الأرض، ولكننا لن نتعرض لهذا الموضوع لطابعه الكمي، وأفضل طريقة للتعبير عنه هي بواسطة القوانين الرياضية.

عند أعلى نقطة كانت سرعة العربة تساوي صفرا وكان ارتفاعها مائة قدما. وفي أسفل نقطة ممكنة يكون ارتفاعها عن الأرض صفرا وسرعتها نهاية عظمى. يمكن التعبير عن هذه الحقائق بطريقة أخرى. عند أعلى نقطة يكون للعربة "طاقة وضع"، ولا يكون لها "طاقة حركة"، وفي أسفل نقطة تكون طاقة حركتها "نهاية عظمى"، وطاقة وضعها "صفرا". وعند أي نقطة متوسطة حيث يكون للعربة ارتفاع وسرعة يكون لها طاقة حركة وطاقة وضع أيضا. وتزداد طاقة الوضع بازدياد الارتفاع بينما تزداد طاقة الحركة بازدياد السرعة. وتكفي مبادئ الميكانيكا لشرح الحركة. ويحتوي الوصف الرياضي على تعبيرين للطاقة، كل منهما يتغير رغم أن مجموعهما

ثابت. وعلى ذلك يكون من الممكن إدخال فكرة طاقة الوضع التي تتوقف على الموضع وفكرة طاقة الحركة التي تعتمد على السرعة رياضيا وبطريقة مضبوطة. وإدخال هذين الاسمين اختياري طبعا وهو يتفق مع طبيعة هذين النوعين المختلفين من الطاقة. ويسمى مجموع هاتين الكميتين، الذي يبقى ثابتا، أحد ثوابت الحركة، ويمكن مقارنة الطاقة الكلية (طاقة الحركة، وطاقة الوضع) مثلا بمبلغ ثابت من المال يتغير باستمرار من عملة لأخرى: من دولارات إلى جنيهات مثلا، وبالعكس حسب نظام تبادل معين.

وفي عربة الملاهي الحقيقية حيث يمنع احتكاك العربة من الوصول إلى ارتفاع نقطة الابتداء، يوجد أيضا تغير مستمر في طاقتي الوضع والحركة، ولكن لا يبقى مجموع الطاقتين ثابتا في هذه الحالة، ولكنه يأخذ في التناقص.



تلزم الآن – لربط الميكانيكا والحرارة – خطوة أخرى جريئة مهمة، وسنرى فيما بعد كثير نتائج وتعميمات هذه الخطوة. لدينا الآن شيء

آخر غير طاقتي الوضع والحركة، وهو الحرارة التي يولدها الاحتكاك. هل تناظر هذه الحرارة التناقض في الطاقة الميكانيكية أي في طاقتي الوضع والحركة؟.. يبدو أن علينا أن نخمن تخمينا جديدا، إذا نظرنا إلى الحرارة كنوع من أنواع الطاقة، فلعل مجموع هذه الأنواع الثلاث – أي طاقة الوضع وطاقة الحركة والحرارة – يظل ثابتا. وليست الحرارة نفسها هي التي تشبه المادة في عدم تلاشيها، ولكن الحرارة وأنواع الطاقة الأخرى مأخوذة معا لا تتلاشى مطلقا. يماثل ذلك حالة رجل يدفع لنفسه عمولة من الفرنكات عن تحويل دولارات إلى جنيهات بحيث يبقى مجموع الفرنكات والدولارات والجنيهات ثابتا حسب نظام تحويل معين.

لقد حطم تقدم العلم النظرية القديمة التي تقول بأن الحرارة سيال، ونحاول الآن الحصول على شئ آخر، الطاقة تكون الحرارة إحدى صوره.

نظام التحويل:

منذ أقل من مائة عام مضت، خمن ماير الدليل الجديد الذي أدى إلى مبدأ اعتبار الحرارة كإحدى صور الطاقة. وقد حقق حول ذلك بالتجربة. من الصدف الغريبة أن أغلب الأبحاث الأساسية المتعلقة بطبيعة الحرارة قام بها رجال لم يحترفوا العلم بل كانوا ينظرون إلى علم الطبيعة على أنه هواية مفضلة فقط؛ فالأسكتلندي "بلاك" كان له أكثر من حرفة واحدة، والألماني "ماير" كان طبيبا، والكونت "رمفورد" الأمريكي – الذي عاش في أوروبا فيما بعد – كان مغامرا كبيرا، وكان جم

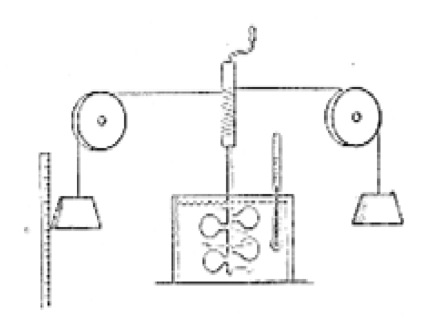
النشاط وقد أصبح في وقت من الأوقات وزيرا للحرب في باثاريا. وهناك أيضا الإنجليزي "جول" الذي كان يشتغل بإنتاج الخمور، والذي أجرى في وقت فراغه بعض تجارب في غاية الأهمية تتعلق بقاعدة بقاء الطاقة؛ لقد حقق جول بالتجربة أن الحرارة هي إحدى صور الطاقة كما عين نظام التحويل.

تكون طاقتا الوضع والحركة لمجموعة معينة الطاقة الميكانيكية للمجموعة، وفي حالة عربة الملاهي جال بخاطرنا أن بعض الطاقة الميكانيكية يتحول إلى حرارة. إذا كان هذا صحيحا؛ فلا بد وأن يوجد في هذه العملية وفي جميع العمليات المشابهة نظام معين للتحويل بين هذين النوعين من الطاقة. هذه مسألة رياضية، ولكن إمكان تحويل كمية من الطاقة الميكانيكية إلى مقدار معين من الحرارة هو في الواقع في غاية الأهمية. نود أن نعلم العدد الذي يمثل نظام التحويل، أي كمية الحرارة التي نحصل عليها من مقدار معلوم من الطاقة الميكانيكية.

وكان غرض جول من إيحائه هو تعيين هذا العدد، وتصميم إحدى تجاربه يشبه كثيرا تصميم ساعة الثقل. وعند ملء مثل هذه الساعة يرتفع ثقلان وبذلك تكتسب المجموعة "طاقة وضع". وإذا لم تمس الساعة فإنه يمكن اعتبارها مجموعة مقفلة ولكن الثقلان يسقطان بالتدريج وتسير الساعة. وبعد فترة زمنية معينة يصل الثقلان إلى أسفل نقطة وتكون الساعة قد توقفت. ما الذي حدث للطاقة؟.. لقد تحولت طاقة

وضع الثقلين إلى طاقة حركة للمجموعة ثم ضاعت بعد ذلك تدريجيا على هيئة حرارة.

وقد استطاع جول أن يقيس الحرارة المفقودة بجهاز من هذا النوع بعد تغييره تغييرا ينطوي على الذكاء، وبذلك تمكن جول من تعيين نظام التحويل، والثقلان في جهازه يجعلان عجلة بدالية تدور وهي مغموسة في ماء، فتحول "طاقة وضع" الثقلين إلى طاقة حركة للأجزاء القابلة للحركة ثم إلى حرارة ترفع درجة حرارة الماء. وقد قاس جول هذا التغير في درجة الحرارة. وحيث أن حرارة الماء النوعية معلومة فقد تمكن بذلك من حساب كمية الحرارة التي استخدمت في التسخين.



وقد لخص جول نتائج محاولات كثيرة كما يلي:

أولا: أن كمية الحرارة الناتجة عن احتكاك الأجسام الصلبة والسائلة يتناسب دائما مع مقدار القوة (يقصد الطاقة) المبذولة.

ثانيا: أن الحصول على كمية الحرارة اللازمة لرفع درجة حرارة رطل من الماء (موزون في الفراغ ودرجة حرارته بين ٥٥ ، ٦٠) درجة فهرنهيتية واحدة يلزم بذل قوة (طاقة) ميكانيكية تمثل بسقوط ٧٧٢ رطلا مسافة قدم واحد. وفي صيغة أخرى: طاقة وضع ٧٧٢ رطل على ارتفاع قدم واحد من سطح الأرض تكافئ الحرارة اللازمة لرفع درجة حرارة رطل من درجة حرارة ٥٥ ف إلى ٦٦ ف. ولقد أمكن الحصول على نتائج أدق لدرجة ما من التجارب التي أجريت بعد ذلك، ولكن الهيكل الأساسي للمكافئ الميكانيكي للحرارة هو ما وجده في عملة المدهش الأول.

ولقد سار التقدم سريعا بعد الانتهاء من هذا العمل المهم؛ فلقد تبينا بعد ذلك أن الطاقة الميكانيكية والحرارة هما صورتان من صور الطاقة العديدة. وكل شئ يمكن تحويله إلى إحدى هاتين الصورتين هو أيضا إحدى صور الطاقة. الإشعاع الناتج عن الشمس طاقة لأن جزءا منه يتحول إلى حرارة على الأرض. للتيار الكهربائي طاقة لأنه قد يسخن سلكا أو قد يدير عجلات محرك. والفحم يمثل الطاقة الكيميائية التي تتحرر على هيئة حرارة عندما يحترق الفحم. وفي كل حدث من أحداث الطبيعة تتحول إحدى صور الطاقة إلى صورة أخرى حسب قانون تحويل معين دائما.

وفي حالة مجموعة مقفلة، أي مجموعة معزولة عن جميع المؤثرات الخارجية تبقى الطاقة محفوظة، وبذلك تكون خواصها مشابهة لخواص

المادة. ويكون مجموع جميع الأنواع المختلفة للطاقة في هذه المجموعة ثابتا رغم أنه من الممكن أن يتغير مقدار أي نوع واحد منها. وإذا اعتبرنا الكون جميعه كمجموعة مقفلة يمكننا أن نعلن بفخار مع علماء الطبيعة في القرن التاسع عشر أن طاقة الكون ثابتة لا تتغير وأن من المستحيل استحداث أي جزء منها أو إضاعته.

ونستطيع إذن أن نميز بين نوعين من الموجودات. المادة كما نعرفها والطاقة. كل من هذين النوعين يتبع قوانين احتفاظ بالذات، فمن المستحيل أن تتغير الكتلة الكلية أو الطاقة الكلية لمجموعة معزولة. المادة لها وزن والطاقة لا وزن لها. أي أن لدينا نوعين مختلفين من الموجودات، وقانوني بقاء.

هل ظلت هذه الآراء صحيحة إلى الآن؟ أم هل تغيرت هذه الصورة – التي تبدو كأنها ذات أساس متين – في ضوء تطورت أحداث؟ في الواقع أنها تغيرت! وترتبط التغيرات في هذه المبادئ بالنظرية النسبية، وسنعود إلى هذه النقطة فيما بعد.

الأساس الفلسفي:

تؤدي نتائج البحث العلمي في كثير من الأحيان إلى تغيير في النظرة الفلسفية لمسائل تمتد إلى أبعد من مجال العلم الضيق. ما هو هدف العلم؟ ما هو المطلوب من نظرية تحاول وصف الكون؟ رغم أن هذه الأسئلة تتعدى حدود علم الطبيعية، فإن لها علاقة قوية به وذلك

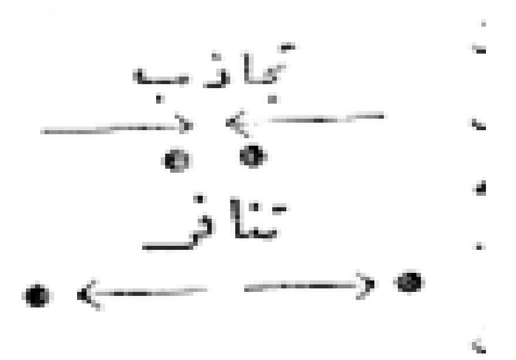
لأن العلم هو السبب في نشأتها. يجب أن تعمم النتائج العلمية فلسفيا. وإذا كون هذا التعميم وقبل على نطاق واسع فإنه يؤدي في كثير من الأحيان إلى تطورات أخرى في التفكير العلمي، وذلك لأنه يبين أحد الطرق الكثيرة التي يمكن سلوكها. وتؤدي الثورات الناجحة على المبادئ المسلم بها إلى تطورات مختلفة تماما وغير منتظرة. وتصبح هذه التطورات الجديدة منبعا لوجهات نظر فلسفية جديدة. ستبدو هذه الملاحظات غامضة وغير ضرورية إلى أن نوضحها بأمثلة من تاريخ علم الطبيعة.

سنحاول هنا وصف الأفكار الفلسفية الأولى عن غرض العلم، لقد كان لهذه الأفكار تأثير قوي على تطور علم الطبيعة إلى أن ظهرت أدلة جديدة (بعد حوالي مائة عام) وحقائق ونظريات جديدة كونت أساسا جديدا للعلم وحتمت ترك المبادئ القديمة. والذي يبحث في تاريخ العلم كله – من الفلسفة الإغريقية إلى علم الطبيعة الحديث – يجد أن المحاولات كانت مستمرة لاختصار تعقد الظواهر الطبيعية إلى بعض المبادئ والعلاقات الأساسية البسيطة. وهذا هو أساس كل الفلسفة الطبيعية ويبدو هذا واضحا حتى في عمل علماء الذرة.

ومنذ ثلاثة وعشرين قرنا كتب ديموقراط:

"إنها لمسألة اتفاق أن نقول أن شيئا حلوا أو مرا أو ساخنا أو باردا أو ذا لون معين. أما في الحقيقة كما تعودنا أن نعتبرها.. الذرات والفراغ هما الشيئان الحقيقيان فقط".

وتبقى هذه الفكرة في الفلسفة القديمة تصورا عبقريا لا غير؛ فالإغريق لم يكونوا يعلمون قوانين الطبيعة التي تربط الحوادث المتتابعة. ولم يبدأ العلم الذي يربط بين النظرية والتجربة فعلا إلا منذ جاليلو. لقد تتبعنا الأدلة الأولى التي أدت إلى قوانين الحركة. لقد بقيت القوة والمادة الفكرتان الأساسيتان لجميع المحاولات التي بذلت لفهم الكون في مائتي عام من البحث العلمي. ويستحيل أن نتصور إحدى هاتين الفكرتين بدون الأخرى، لأن المادة يظهر وجودها كمنبع للقوة بتأثيرها على مادة أخرى.



فلنعتبر الآن أبسط الأمثلة.. نقطتان ماديتان وقوى تؤثر بينهما، وأسهل القوى في التخيل هي قوى الجذب والطرد، وفي كلتا هاتين الحالتين يقع متجه القوة على المستقيم الواصل بين النقطتين الماديتين

ويؤدي تبسيط الموضوع إلى حالة نقطتين ماديتين كل منها تجذب أو تطرد الأخرى، إذ أن أي فرض آخر عن القوى المؤثرة يعطي صورة أكثر تعقيدا.

هل يمكننا أن نفرض فرضا بسيطا آخر عن طول متجهات القوة؟ حتى إذا أردنا أن نتجنب الفروض الخاصة إلى حد كبيرة، فإنه من الممكن أن نقول: تتوقف القوة بين أي نقطتين ماديتين على البعد بينهما فقط، مثل قوى الجاذبية.. يبدو هذا بسيطا. ويمكننا أن نتخيل قوى أكثر تعقيدا من ذلك مثل القوى التي تتوقف على البعد بين النقطتين الماديتين وأيضا على سرعتيهما. وإذا أخذنا المادة والقوة كعقيدتين أساسيتين، فإن من الصعب تخيل فروض أبسط من القول بأن القوى تعمل في المستقيم الواصل بين النقطتين بأنها تتوقف فقط على البعد بينهما.. ولكن هل من الممكن وصف جميع الظواهر الطبيعية بدلالة قوى من هذا النوع فقط؟

إن نتائج الميكانيكا العظيمة في كل الفروع، ونجاحها الباهر في تطور علم الفلك وتطبيق مبادئها على مسائل مختلفة ليست لها صلة ظاهرة بالميكانيكا، قد ساعدت على الاعتقاد بإمكان اختصار جميع الظواهر الطبيعية إلى قوى بسيطة تعمل بين أشياء لا تتغير. وتظهر هذه المحاولة – سواء كانت مقصودة أم لا – في جميع الاكتشافات العلمية التي حدثت في القرنين اللذين تليا عهد جاليليو.

وقد ذكر "هلمهولتز" ذلك بوضوح في حوالي منتصف القرن التاسع عشر: "وإذن نكتشف أخيرا أن مشكلة علم الطبيعة المادي هي أن نرجع بالظواهر الطبيعية ثانية إلى قوى جاذبة وطاردة لا تتغير ولا تتوقف شدتها إلا على البعد. ويتوقف فهم الكون على حل هذه المسألة".

أي أنه حسب رأي "هلمهولتز" يكون اتجاه تطور العالم محددا وطريقه معينا.

"وستنتهي رسالته بمجرد أن يتم اختزال الظواهر الأساسية إلى قوى بسيطة، وبمجرد أن تثبت أن هذا هو الاختزال الوحيد الممكن لهذه الظواهر".

تظهر هذه الفكرة كأنها بدائية وسخيفة بالنسبة إلى عالم طبيعة في القرن العشرين فما يخيفه أن يتصور أن من الممكن الانتهاء من مغامرات البحث الكبرى والحصول على صورة ثابتة للكون لا تتغير بمرور الزمن ولا تثير الاهتمام إن لم تكن خاطئة. ورغم أن هذه المبادئ تختصر وصف جميع الحوادث إلى قوى بسيطة، فإنها لا تحدد العلاقة بين القوى وبين البعد. ومن الممكن أن تختلف هذه العلاقة باختلاف الظواهر الطبيعية، وطبعا يكون إدخال أنواع مختلفة من القوى للأحداث المختلفة غير مناسب من وجهة النظر الفلسفية.

ومع ذلك فإن هذا الرأي المسمى "وجهة النظر الميكانيكية" الذي صاغه "هلمهولتز" بوضوح، قد لعب دورا مهما في وقته. وتكوين نظرية

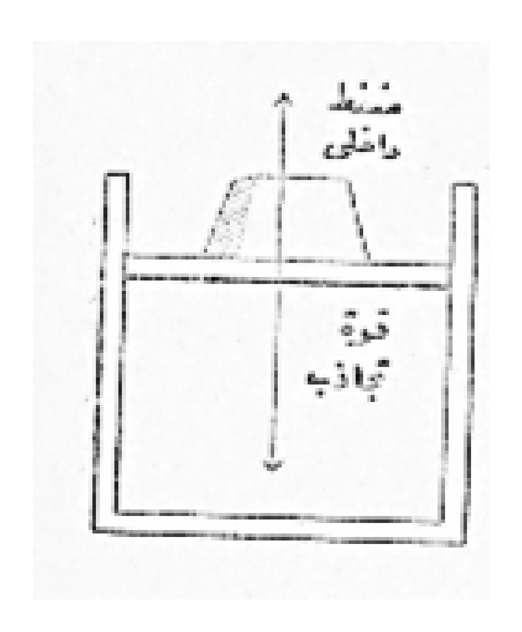
الحركة للمادة هو أحد النتائج المهمة للاتجاه الميكانيكي. وقبل أن نشاهد زوال هذا الاتجاه، فلنوافق مؤقتا على وجهة نظر علماء القرن الماضي، ونرى ماذا يمكن استخلاصه من الصورة التي رسموها للعالم الخارجي.

نظرية الحركة للمادة:

هل من الممكن تفسير ظاهرة الحرارة بدلالة حركة جسيمات تتفاعل بقوى بسيطة؟ نفرض أن لدينا وعاءا مقفلا يحوي كتلة معينة من غاز (الهواء مثلا) في درجة حرارة معينة، بالتسخين ترتفع درجة الحرارة وبذلك تزداد الطاقة. ولكن ما هي علاقة هذه الحرارة بالحركة؟ إن الذي يجعلنا نعتقد في وجود علاقة بين الحرارة والحركة شيئان، الأول: وجهة النظر الفلسفية التجريبية المعترف بها، والثاني: تولد الحرارة بالحركة. إذا كانت جميع المسائل الموجودة في الحياة مسائل ميكانيكية فلا بد وأن تكون الحرارة طاقة ميكانيكية. والغرض من نظرية الحركة هو التعبير عن المادة بهذه الطريقة؛ فحسب هذه النظرية نعتبر أي غاز كمجموعة كبيرة العدد من الجسيمات أو الجزيئات تتحرك في جميع الاتجاهات وتتصادم مع بعضها وتغير اتجاه حركتها بعد التصادم. ويجب أن توجد قيمة متوسطة لسرعة الجزيئات كما يوجد سن متوسط أو ثروة متوسطة لمجتمع إنساني كبير. أي أن هناك طاقة حركة متوسطة لكل جزيئ، وازدياد الحرارة في الوعاء يعني زيادة متوسط طاقة الحركة. وحسب هذه الصورة لا تكون الحرارة نوعا خاصا من الطاقة يختلف عن الطاقة الميكانيكية،

وإنما هي طاقة حركة الجزيئات. ويناظر كل درجة حرارة اختياريا، إذا أردنا تكوين صورة ميكانيكية متماسكة للمادة فإنه يتحتم علينا أن نأخذ طاقة حركة الجزيئ كمقياس لدرجة حرارة الغاز.

وهذه النظرية ليست إحدى تخيلات العقل فقط، فمن الممكن البرهنة على اتفاق نظرية الحركة للغازات مع التجربة وعلى أنها تؤدي فعلا إلى فهم أعمق للحقائق، ويمكن توضيح ذلك بأمثلة قليلة. لدينا وعاء مغلق بمكبس يمكنه (أي المكبس) أن يتحرك بحرية. ويحتوي الوعاء على مقدار معين من غاز محفوظ في درجة حرارة ثابتة. إذا كان المكبس ساكنا عند الابتداء فيمكننا أن نحركه إلى أعلى وإلى أسفل بتقليل أو زيادة الثقل الموضوع عليه. ولدفع المكبس إلى أسفل يلزم استعمال قوة تعمل ضد الضغط الداخلي للغاز. ما هي طريقة عمل الضغط الداخلي حسب نظية الحركة؟.. تتحرك الجزيئات ذات العدد الهائل التي يتركب منها الغاز في جميع الاتجاهات، وهي تدق السطوح والمكبس وترتد ثانية (مثل كرات مقذوفة على حائط). وهذا الدق المستمر بعدد كبير من الجزيئات يحفظ المكبس على ارتفاع معين وذلك بمعادلة قوى الجاذبية التي تؤثر إلى أسفل على المكبس والأثقال. تؤثر قوة الجاذبية الثابتة في الاتجاه الأول، بينما عدد كبير من القوى غير المنتظمة الناتجة من تصادم الجزيئات في الاتجاه الآخر. إذن لكي يحدث التوازن لا بد وأن تكون محصلة هذا القوى غير المنتظمة مساوية لقوة الجاذبية.



نفرض أن المكبس دفع إلى أسفل وأن حجم الغاز نقص نتيجة لذلك إلى جزء كسري من قيمته الأولى – نصفه مثلا – بينما تبقى درجة حرارته ثابتة. ماذا ننتظر أن يحدث حسب نظرية الحركة؟ هل سيكون تأثير القوى الناتجة عن دق الجزيئات على المكبس أكبر أو أقل من تأثيرها السابق؟.. تقترب الجزيئات الآن من بعضها بدرجة أكبر منها أولا. ورغم أن قيمة متوسط طاقة الحركة تبقى كما هي فإن عدد مرات تصادم الجزيئات مع المكبس يزداد (في نفس الفترة الزمنية) وبذلك تكون القوة الكلية أكبر.

واضح من هذه الصورة التي ترسمها نظرية الحركة أنه يلزم وضع ثقل آخر لكي يبقى المكبس متزنا في هذا الوضع المنخفض الجديد. هذه الحقيقة العملية البسيطة مألوفة تماما، ولكن يمكن الحصول عليها

منطقيا من نظرية الحركة للمادة. وهناك تجربة أخرى: خذ وعاءين يحتويان على حجمين متساويين من غازين مختلفين (الأيدروجين والنتروجين مثلا) في درجة حرارة واحدة. افرض أن الوعاءين مغلقان بمكبسين متماثلين تماما، وأن فوق كل منهما ثقلا متساويا. بالاختصار، هذا يعني أن كلا من الغازين له نفس الحجم ونفس درجة الحرارة ونفس الضغط، حيث أن درجة الحرارة واحدة، ينتج حسب النظرية أن متوسط طاقة الحركة عن الجزئ له نفس القيمة في الحالتين وحيث أن الضغطين متساويان، فإن القوة الكلية الناتجة عن تصادم الجزيئات بالمكبس تكون لها نفس القيمة في الحالتين. في المتوسط، يكون لكل جزيئ نفس طاقة الحركة، وحيث أن الكل من نفس الحجم، فإنه يتحتم أن يكون عدد الجزيئات الموجودة في كل منهما واحدا رغم أن الغازين مختلفان كيميائيا. لهذه النتيجة أهمية كبرى في فهم كثير من الظواهر الكيميائية وهي تعني أن عدد الجزيئات في حجم معين عند درجة حرارة معينة وضغط معين هو شئ لا يختلف من غاز لغاز، وإنما ذو قيمة واحدة لجميع الغازات. ومن المدهش حقا أنه فضلا عن أن نظرية الحركة تؤدي إلى وجود هذا العدد فإنها تمكننا أيضا من تعيينه. وسنعود إلى هذه النقطة في القريب العاجل.

تفسر نظرية الحركة للمادة كميا ونوعيا قوانين الغازات كما وجدت بالتجربة. وفضلا عن ذلك فالنظرية لا تقتصر على الغازات ولكن نجاحها الباهر كان في هذا المجال. يمكن إسالة الغاز بخفض درجة الحرارة، ومعنى انخفاض درجة حرارة مادة هو نقص متوسط كمية حركة جزيئاتها.

وعلى ذلك يتضح أن متوسط حركة جزيئ سائل أقل من متوسط طاقة حركة جزيئ الغاز المناظر.

ولقد أزيح الستار عن حركة الجزيئات في السوائل أول مرة بما يسمى "حركة براون"، وهي ظاهرة مدهشة. وبدون نظرية الحركة للمادة تظل هذه الظاهرة غامضة وغير مفهومة. وقد لاحظ عالم النبات براون هذه الظاهرة لأول مرة، ولم تُفسر إلا في بداية القرن الحالي أي بعد ثمانين عاما.

والجهاز الوحيد الذي يلزم لمشاهدة حركة "براون" هو الميكروسكوب، وليس من الضروري أن يكون الميكروسكوب المستعمل من نوع ممتاز، وكان براون يشتغل على حبيبات نباتات معينة أي: جسيمات ذات حجم كبير بدرجة غير مألوفة ويتراوح طول الواحدة من١\٤٠٠٠ إلى ١\٤٠٠٠٠ من البوصة – كما يقول براون – ونقتبس مما كتبه براون: "عند فحص هذه الجسيمات مغموسة في الماء، لاحظت أن كثيرا منها يتحرك، وبعد إعادة المشاهدة مرات عديدة اقتنعت بأن هذه الحركات لم تنشأ عن تيارات في المائع ولا عن تبخره التدريجي وإنما ترجع إلى الجسيم نفسه".

والذي لاحظه براون هو الإثارة المستمرة للحبيبات عندما تغمس في الماء، ويمكن رؤية ذلك بالميكروسكوب، وإنه لمنظر يؤثر في النفس.

هل ترتبط هذه الظاهرة بنبات معين فقط؟.. أجاب بروان على هذا السؤال بإعادة التجربة على نباتات مختلفة كثيرة، ووجد أن جميع الحبيبات المختلفة تتحرك حركة مشابهة. وزيادة على ذلك وجد نفس هذا النوع من عدم الاستقرار لا في جسيمات المواد العضوية فقط، وإنما لجسيمات المواد غير العضوية أيضا. وحتى قطعة صغيرة مطحونة من تمثال قديم حققت نفس الظاهرة.

كيف تفسر هذه الحركة؟.. إنها تظهر كأنها تتعارض مع كل ما قبلناه فيما سبق؛ فملاحظة موضع جسيم معلوم واحد كل نصف دقيقة مثلا، تزيح الستار عن مساره العجيب. والشئ الذي يكاد لا يصدق حقا هو الصفة المستمرة الظاهرة للحركة. إذا وصفنا بندول يتأرجح في ماء فإنه يسكن بعد فترة من الوقت إلا إذا أثرت عليه قوة خارجية أخرى. ووجود حركة مستمرة يبدو متعارضا مع كل التجارب السابقة. ونتغلب على هذه الصعوبة بطريقة مدهشة بتطبيق نظرية الحركة للمادة.

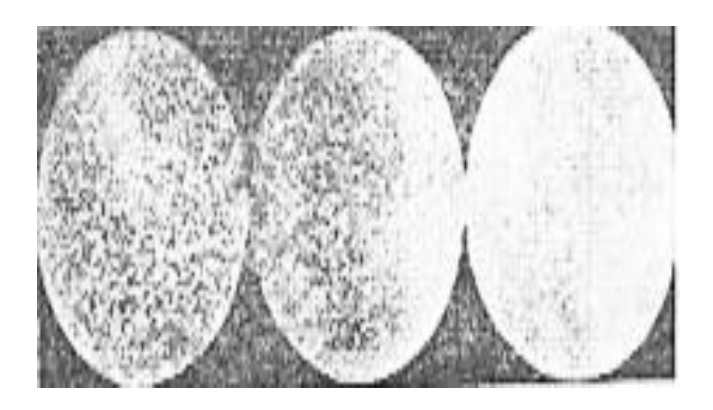
إذا استعملنا أقوى الميكروسكوبات التي في حيازتنا، ونظرنا إلى الماء فإنه يتعذر علينا رؤية الجزيئات أو حركاتها كما تصورها لنا نظرية الحركة للمادة. وعلى ذلك إذا كانت النظرية التي تنص على أن الماء هو مجموعة جزيئات صحيحة فلا بد وأن يكون حجم هذه الجزيئات أصغر من أصغر حجم يمكن رؤيته بأقوى الميكروسكوبات. بالرغم من ذلك دعنا نعتقد بصحتها وبأنها تعطينا صورة للحقيقة.

إن جسيمات براون التي نراها إذا نظرنا بالميكروسكوب تتحرك مندفعة نتيجة لتسلط الجزيئات التي تكون الماء عليها رغم أن حجم هذه الجزيئات أصغر منها. وتنشأ حركة براون إذا كانت الجسيمات المندفعة صغيرة بدرجة كافية. وحركة هذه الجسيمات غير منتظمة لأن تسلط جزيئات السائل عليها غير منتظم، ولا يمكن إيجاد قيمة متوسطة له نتيجة لعدم انتظامه فالحركة التي نشاهدها هي في الواقع نتيجة للحركة التي يتعذر مشاهدتها. وخواص الجسيمات الكبيرة تعكس إلى حد ما خواص الجزيئات. ويمكن التعبير عن ذلك في صيغة أخرى بأن نقول أن صفات الجسيمات هي صورة مكبرة لصفات الجزيئات بدرجة تجعل في الإمكان ملاحظتها بالنظر في الميكروسكوب، وخواص مسار جسيم براون غير المنتظم (أي المسار)، والذي لا يوجد ارتباط بينه وبين الزمن يدل على أن خواص مسارات الجزيئات الصغيرة التي تكون المادة تكون غير منتظمة أيضا بطريقة مشابهة. وعلى ذلك نرى أن الدراسة الكمية لحركة براون تجعل نظرنا يصل إلى أطراف بعيدة من نظرية الحركة. من الواضح أن حركة براون التي نشاهدها تتوقف على حجم وكتلة الجزيئات المتسلطة. ولن تكون هناك حركة ما إذا لم يكن لهذه الجزيئات المتسلطة كمية معينة من الطاقة، أي إذا لم يكن لها كتلة وسرعة، لذلك لا ندهش إذا علمنا أن دراسة حركة براون قد تؤدي إلى تعيين كتلة الجزيئ.

لقد تكونت نظرية الحركة كميا لبحوث نظرية وعملية قاسية، والدليل الذي ظهر نتيجة لحركة براون كان أحد الأدلة التي أدت إلى

النتائج الكمية ويمكننا الحصول على نفس هذه النتائج بطرق مختلفة مبتدئين بأدلة أخرى مختلفة. وإنها لحقيقة ذات أهمية كبيرة أن كل هذه الطرق تؤيد نفس وجهه النظر وذلك لأنها توضح تماسك وتناسق نظرية الحركة للمادة.

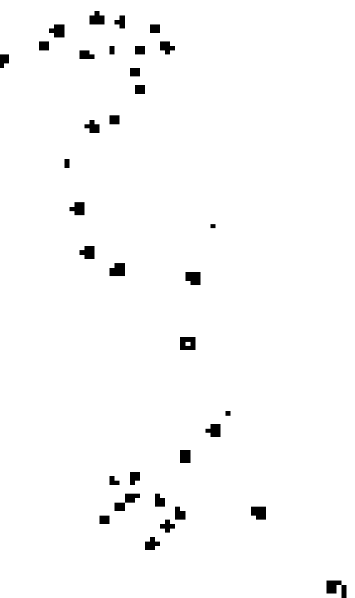
اللوحة الثانية



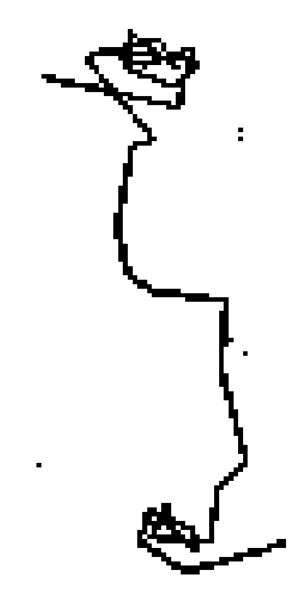
جسيمات براون كما ترى خلال الميكروسكوب (أخذ الصورة في بيران)



أحد جسيمات براون كما صور بتعريض وتغطية سطح
(أخذ الصورة برمبرج وفافيلوف)



أوضاع متتالية لأحد جسيمات براون



المسار التقريبي مستنتجا من هذه الأوضاع المتتالية

سنذكر هنا واحدة فقط من هذه النتائج الكمية الكثيرة التي حصل عليها نظريا وعمليا. نفرض أن لدينا جراما من أخف العناصر وهو الأيدروجين. ما هو عدد الجزيئات الموجودة في هذا الواحد؟ إن الإجابة على هذا السؤال لا تكون مميزة للأيدروجين وحده بل لجميع الغازات لأننا نعلم الشروط التي تحتها يحتوي غازين مختلفين على عدد واحد من الجزيئات.

تمكننا النظرية، بعد الحصول على قياسات معينة تتعلق بحركة براون من الإجابة على هذا السؤال والجواب هو عدد كبير جدا بدرجة يصعب تصديقها.

عدد الجزيئات الموجودة في جرام من الأيدروجين هو ۰۰۰، ۰۰۰، ۰۰۰، ۰۰۰، ۰۰۰، ۰۰۰، ۰۰۰، ۰۰۰، ۳۰۳

تخيل أن حجم جزيئات الأيدروجين قد كبر بدرجة تمكننا من رؤيتها بالميكروسكوب، كأن يصبح قطر الجزء – مثلا – قسما واحدا من خمسة آلاف قسم من البوصة أي مثل قطر جسيم براون. لحفظ هذه الجزيئات يلزمنا صندوق مكعب طول ضلعه يساوي ربع ميل! يمكننا بسهولة أن نحسب كتلة أحد الجزيئات الأيدروجين هذه، وذلك بقسمة "١" على العدد المذكور فيما سبق.

والجواب هو كمية صغيرة للغاية ۳۳ ۰۰ ۰۰۰ ۰۰۰ ۰۰۰ ۰۰۰ ۰۰۰ ۰۰۰ ۰۰۰ ۰۰۰ ، ۰ جرام

والتجارب التي أجريت على حركة براون هي بعض التجارب المستقلة الكثيرة التي أدت إلى تعيين هذا العدد الذي يلعب دورا مهما للغاية في علم الطبيعة. ونلاحظ في نظرية الحركة للمادة وفي جميع نتائجها تحقق المبدأ الفلسفي العام: جعل تفسير الظواهر يتوقف فقط على التفاعل بين جزيئات المادة

ونلخص ما سبق كما يأتي:

"في الميكانيكا يمكن التنبأ بالمسار الذي سيرسمه جسم متحرك إذا علمنا حالته الراهنة والقوى التي تؤثر عليه. فمثلا يمكننا معرفة

المسارات التي ستسير فيها جميع الكواكب في المستقبل. والقوى الفعالة هي قوى نيوتن الجاذبة التي تتوقف على البعد فقط، والنتائج العظيمة للميكانيكا الكلاسيكية تقوي الاعتقاد بإمكان تطبيق وجهة النظر الميكانيكية باستمرار على جميع فروع علم الطبيعة، وبأنه يمكن تفسير جميع الظواهر بدلالة قوى تمثل إما الجذب أو الطرد وتتوقف على البعد وتؤثر بين جسيمات لا تتغير.

في نظرية الحركة للمادة، نرى كيف أن هذا الاتجاه الذي نشأ من مسائل ميكانيكية، يفسر ظاهرة الحرارة ويؤدي إلى رسم صورة ناجحة لتركيب المادة.

الباب الثاني

تداعي وجهة النظر الميكانيكية

المائعان الكهربائيان:

تحتوي الصفحات التالية على وصف ممل لسببين الأول هو أن وصف التجارب، دون إجرائها فعلا، لا يثير الاهتمام، والثاني هو أن معنى هذه التجارب لن يتضح حتى تظهره النظرية التي ستصل إليها، وغرضنا هو إعطاء مثال جيد يوضح الدور الذي تلعبه النظريات في علم الطبيعة.

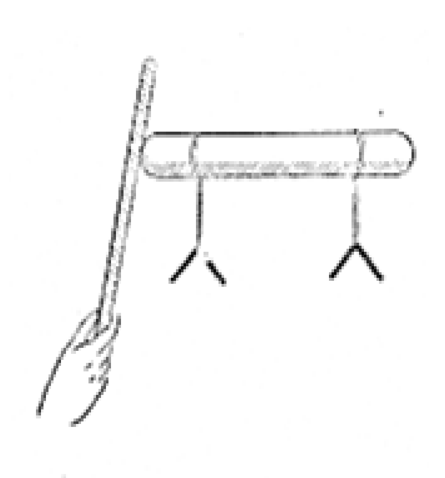
قضيب معدني محمول على قاعدة زجاجية ويتصل كل من طرفي القضيب بواسطة سلك بإلكتروسكوب. ما هو الإليكتروسكوب؟.. هو جهاز بسيط أجزاؤه الرئيسية هي ورقتان ذهبيتان معلقتان في نهاية قطعة معدنية قصيرة. والمجموعة محفوظة داخل إناء زجاجي بحيث لا يمس المعدن إلا الأجسام غير المعدنية أو المواد الغازلة كما تسمى. وفضلا عن الإليكتروسكوب والقضيب الزجاجي لدينا قضيبهم من المطاط الخشن، وقطعة من قماش الفانلة.

ونجري التجربة كما يأتي:

١- تأكد أولا من أن ورقتي الذهب متقاربتان دون انفراج لأن هذا وضعها العادي. إذا فرض أن الورقتين لم تكونا في هذا الوضع يمكن إعادتهما إلى الوضع العادي بلمس القضيب المعدني، بعد القيام بهذه العمليات الأولية ندلك قضيب المطاط بشدة بواسطة قماش الفانلة، ثم

نجعله يلامس المعدن. فتنفرج الورقتان على الفور، وتبقى الورقتان منفرجتين حتى بعد إبعاد قضيب المطاط.

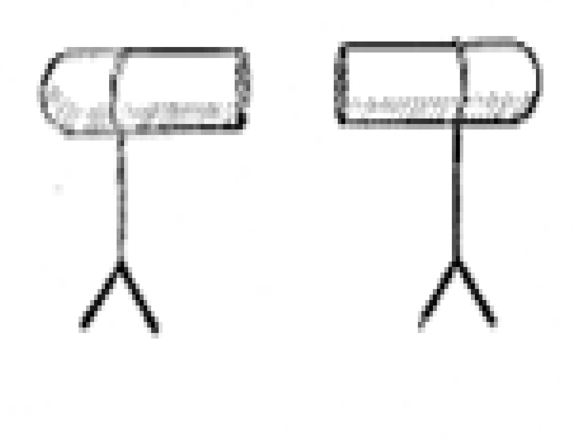
٢- نجري تجربة أخرى باستعمال نفس الجهاز السابق بحيث تكون الورقتان منطبقتين عند بدء التجربة. في هذه التجربة نجعل قضيب المطاط يقترب من المعدن دون أن يلامسه مرة أخرى فتنفرج الورقتان. وإذا أبعدنا قضيب



المطاط عن المعدن دون أن يلمسه فإن الورقتين تنطبقان على الفور وتعودان إلى وضعهما العادي على عكس الحالة السابقة التي تبقى فيها الورقتان منفرجتان حتى بعد إبعاد قضيب المطاط.

٣- في التجربة الثالثة سنحدث تغيرا طفيفا في الجهاز – نفرض أن القضيب المعدني يتكون من جزئين متصلين ببعضهما – ندلك قضيب المطاط بقماش الفانلة مرة أخرى، ونقربه من المعدن. نشاهد نفس الظاهرة، أي انفراج ورقتي الذهب.. نفصل الآن بين جزئي القضيب المعدني، ثم نبعد قضيب المطاط. نلاحظ أن ورقتي الذهب تبقيان منفرجتين في هذه الحالة بدلا من انطباقهما كما في التجربة الثانية.

يصعب إثارة الاهتمام بهذه التجارب البسيطة، وربما كان الذي يجريها في العصور الوسطى ينال التأنيب. وهي تبدو لنا مملة وغير منطقية، ويصعب إعادة هذه التجارب دون لبس بعد قراءة واحدة لهذا الوصف. وقد تفهم هذه التجارب لو علمنا شيئا عن الوصف، بل إنه يمكننا أن نقول أن احتمال إجراء مثل هذه التجارب دون فكرة سابقة محددة عن معناها هو احتمال بعيد للغاية



نسوق الآن الفكرة الأساسية لنظرية بسيطة تفسر جميع الحقائق التي وصفناها فيما سبق.

يوجد مائعان كهربائيان يسمى أحدهما موجب (+) والآخر سالب (−) وهما يشبهان لحد ما نظرية السيال التي سبق شرحها، فكما في حالة الحرارة يبقى مقدار هذين المائعين في أية مجموعة معزولة ثابتا رغم ازدياده أو نقصه في أي فرد من أفراد هذه المجموعة. ولكن يوجد فرق

أساسي بين هذه الحالة وبين حالة الحرارة أو المادة أو الطاقة. لدينا نوعان من السيال الكهربائي، ولا يمكن هنا تشبيه الكهرباء بالعملة – كما فعلنا فيما سبق – إلا إذا عممنا هذا التشبيه بعض الشيئ. يقال أن جسما متعادل كهربائيا إذا كان المائعان الكهربائيان (الموجب والسالب) يلاشي كل منهما الآخر بالضبط: وإذا كان شخص لا يملك شيئا فإما أن يكون هذا الشخص ليس لديه مال على الإطلاق، وإما أن يكون المبلغ الذي يحفظه في خزانته يساوي تماما مجموع ما عليه من الديون، ويمكننا مقارنة المبلغ الموجود في خزانة هذا الشخص بالمائع الكهربائي الموجب وديونه بالمائع الكهربائي السالب.

والفرض التالي في النظرية هو أن المائعين الكهربائيين اللذين من نوع واحد يتنافران (بطرد كل منهما الآخر) وإذا كانا من نوعين مختلفين فإن كلا منهما يجذب الآخر. ويمكن تمثيل ذلك بالرسم كما يأتي.

ويبقى فرض نظري ضروري آخر: يوجد نوعان من الأجسام، النوع الأول "الأجسام الموصلة للكهرباء" يمكن لهذين المائعين الحركة فيه بحرية، والنوع الثاني "الأجسام العازلة للكهرباء" يتعذر على المائعين والحركة فيها. ويجب

ألا يفهم القارئ أن أي جسم هو إما عازل أو موصل. فالموصل والعازل المثاليان لا يوجدان إلا في الخيال ولا يمكن الحصول على أيهما فعلا. فالمعادن والأرض وجسم الإنسان كلها توصل الكهرباء، ولكن ليس بنفس الدرجة. والزجاج والمطاط والصيني وما ماثلها تعزل الكهرباء. أما الهواء فهو يعزل الكهرباء بدرجة محدودة فقط بما يعلم أي شخص يشاهد التجارب التي وصفناها: وقد جرت العادة أن تعزى النتائج السيئة لتجارب الكهربائية الساكنة (التجارب الإلكتروستاتيكية) إلى رطوبة الهواء وهو عذر جد مقبول.

تكفي هذه الفروض النظرية لتفسير التجارب التي وصفناها.

١- قضيب المطاط متعادل كهربائيا في الظروف العادية مثله في ذلك مثل جميع الأجسام الأخرى، وهو يحتوي على مقدارين متساويين من المائعين الموجب والسالب. وهذه العبارة اصطلاح محض لأننا نطبق فيها الأسماء التي أوجدتها النظرية لكي نتمكن من وصف عملية الدلك. ويسمى نوع الكهرباء الذي يزداد مقداره (عن مقدار النوع الآخر) في قضيب المطاط بعد الدلك سالبا، ومن المؤكد أيضا أن هذا الاسم مسألة اتفاق فقط. وإذا دلكنا قضيبا من الزجاج بفراء قط، فحسب ما اتفق عليه يكون نوع الكهرباء الزائد موجبا. لنبدأ الآن في التجربة: نحضر مائعا كهربائيا إلى المعدن وذلك بملاسته للمطاط. وفي المعدن يمكن للمائع الكهربائي أن يتحرك بحرية. وعلى ذلك فإنه ينتشر على سطح المعدن جميعه بما فيه الورقتان الذهبيتان. وحيث أن تأثير الكهرباء

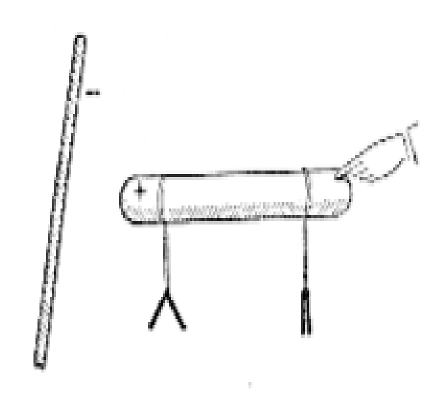
السالبة على الكهرباء السالبة هو التنافر فإن كلا من الورقتين تحاول أن تبتعد عن الأخرى أكبر مسافة ممكنة، وتكون النتيجة هي الانفراج الذي نشاهده. وحيث أن المعدن يستند على زجاج أو أي عازل آخر، فإن المائع يبقى على الموصل زمنا يطول أو يقصر على حسب ما تسمح به درجة توصيل الهواء. نفهم الآن لماذا يتحتم لمس المعدن قبل البدء في التجربة؛ ففي هذه الحالة يكون المعدن وجسم الإنسان والأرض موصلا واحدا هائلا ، وينتشر المائع الكهربائي على هذا الموصل الهائل ولا يبقى منه شئ يذكر على الإليكتروسكوب.

٢– تبدأ هذه التجربة مثل التجربة السابقة تماما، ولكن المطاط لا يمس المعدن بل يقترب منه فقط. وحيث أن المائعين الموجودين في المعدن يمكنها الحركة بحرية، فإنهما يتفرقان ويجذب أحدهما بينما يطرد الآخر. ويمتزج المائعان مرة أخرى عندما يبعد قضيب المطاط، وذلك لأن المائعين المختلفي النوع يجذب كل منهما الآخر.

٣– في هذه التجربة نفصل المعدن إلى قسمين وبعد ذلك نبعد قضيب المطاط في هذه الحالة يتعذر على المائعين أن يمتزجا، وعلى ذلك تحتفظ ورقتا الذهب بزيادة من أحد المائعين وتبقيان منفرجتين.

تبدو جميع الحقائق التي ذكرناها فيما سبق مفهومة في ضوء هذه النظرية البسيطة، وتقوم هذه النظرية بأكثر من ذلك، ففضلا عن الحقائق السابقة تمكننا النظرية من فهم حقائق أخرى كثيرة عن الكهرباء الساكنة.

الغرض من أية نظرية جديدة هو أن تؤدي إلى اكتشاف ظواهر وقوانين جديدة، ويتضح ذلك بمثال كالآتي: تصور تغييرا في التجربة الثانية. افرض أن قضيب المطاط يبقى قريبا من المعدن وإنك في نفس الوقت تلمس الموصل بإصبعك، ماذا يحدث الآن؟ وتجيب النظرية على ذلك بأنه يمكن للمائع المطرود (-) أن يهرب عن طريق جسمك، وتكون النتيجة أن يبقى مائع واحد هو المائع الموجب. وأوراق الإليكتروسكوب القريبة من قضيب المطاط هي التي تبقى منفرجة ويمكن التحقق من ذلك بتجربة فعلية .



إذا نظرنا إلى هذه النظرية في ضوء علم الطبيعة الحديث، فمن المؤكد أننا سنجدها بسيطة بدائية وغير مرضية. وبالرغم من ذلك فهي مثال جيد يبين الخواص التي تميز كل نظرية طبيعية. ولا توجد نظريات دائمة في العلم فبعض الحقائق التي تتنبأ بها نظرية ما كثيرا ما يثبت عدم صحتها بالتجربة. ولكل نظرية فترة معينة تنمو فيها تدريجيا وتزدهر، وقد تتداعى بعد ذلك بسرعة. ونشأة وسقوط نظرية السيال للحرارة هو أحد

الأمثلة الكثيرة على ذلك، وسندرس أمثلة أخرى أكثر أهمية وعمقا فيما بعد.

ويكاد ينشأ كل تقدم علمي عظيم من أزمة في النظرية القديمة، وذلك نتيجة للبحث عن مخرج من الصعوبات الموجودة. يجب أن نختبر المبادئ والنظريات القديمة رغم أنها تنتسب إلى الماضي، لأن هذا هو الطريق الوحيد لفهم أهمية ومدى صحة المبادئ والنظريات الجديدة.

في الصفحات الأولى من هذا الكتاب، قارننا الدور الذي يقوم به الباحث بعمل المخبر البوليسي الذي يجد الحل الصحيح بالتفكير البحث بعد أن يجمع الحقائق الضرورية. ولكن هذا التشبيه سطحي فقط ولا أساس له؛ ففي كل من الحياة الواقعية، والقصص البوليسية تكون الجريمة معروفة. وعلى المخبر البوليسي أن يبحث عن خطابات وبصمات أصابع ورصاص ومسدسات، ولكنه يعلم تماما أن جريمة قد ارتكبت. أما حالة العالم فليست كذلك، وليس من الصعب أن تتخيل شخصا لا يعلم شيئا. لنفرض الآن أن في حوزة هذا الشخص معدن وقضيب من المطاط وقطعة من قماش الفانلة وورقتان من الذهب وزجاجات.. وبالاختصار كل ما نحتاجه لإجراء التجارب الثلاث السابقة، بالرغم من أن هذا الشخص ذو ثقافة عالية فإنه في الغالب سيستعمل الزجاجات في حفظ الخمر، وقماش الفانلة في التنظيف، ولن يفكر مطلقا في عمل الأشياء التي وصفناها. أما في حالة المخبر البوليسي

فالجريمة معروفة، أي أن المسألة مصاغة! من الذي قتل محمد حسن؟ ويجيب على العالم نفسه أن يرتكب الجريمة إلى حد ما، وأن يقوم بالبحث أيضا، وزيادة على ذلك مهمته ليست مقصورة على تفسير حالة واحدة معينة، بل هي تفسير جميع الظواهر التي حدثت والتي قد تحدث فيما بعد:

في المقدمة التي أعطيناها لتوضيح فكرة المائعين، نرى بوضوح تأثير الفكرة الميكانيكية التي تحاول تفسير كل ظاهرة بدلالة المادة وبدلالة القوى البسيطة التي تعمل بينها، وإذا أردنا أن نبين ما إذا كان من الممكن تطبيق وجهة النظر الميكانيكية لوصف الظواهر الكهربائية، فإنه يتحتم علينا دراسة المسألة الآتية: نفرض أن لدينا كرتين صغيرتين على كل منهما شحنة كهربائية، أي أن على كل منهما زيادة معينة من أحد المائعين. نعلم أن الكرتين إما أن تتجاذبا أو تتنافرا، ولكن هل تتوقف القوة المؤثرة على البعد فقط؟.. وإذا كان الأمر كذلك فما هي العلاقة بين القوة والبعد؟.. يبدو أن أبسط تخمين ممكن هو أن العلاقة بين القوة والبعد في هذه الحالة، هي نفس العلاقة بينهما في حالة قوة الجاذبية التي فيها على سبيل المثال تنقص القوة إلى تسع قيمتها إذا ازداد البعد إلى ثلاثة أمثاله.

لقد أثبت كولوم صحة هذا القانون بالتجارب التي أجراها؛ فبعد مائة عام من اكتشاف نيوتن لقانون الجاذبية وجد كولوك قانونا مشابها

يربط بين القوة الكهربائية والبعد، ونقطتا الاختلاف الرئيسيتان بين قانوني نيوتن وكولوم هما:

(١) توجد قوى الجاذبية باستمرار بينما لا توجد القوى الكهربائية إلا إذا كان الجسمان مشحونين بالكهرباء.

(٢) في حالة الجاذبية توجد قوة جاذبة فقط، ولكن القوة الكهربائية قد تكون جاذبية أو طاردة. ينشأ هنا نفس السؤال الذي درسناه في حالة الحرارة: هل للمائعين الكهربائيين وزن أم لا؟ أو بعبارة أخرى هل وزن قطعة معدنية وهي في حالة التعادل يساوي وزنها وهي مشحونة بالكهرباء؟ بواسطة الموازين الموجودة لدينا لا تتبين أي فرق في الوزن في هاتين الحالتين. وعلى ذلك نستنتج أن المائعين الكهربائيين سيالان لا وزن لهما.

يستلزم التقدم في دراسة نظرية الكهرباء إدخال فكرتين جديدتين، ومرة أخرى سنتحاشى التعاريف المضبوطة، مستخدمين بدلا منها طريقة المقارنة بالمبادئ التي نعرفها جيدا. ونحن نذكر أهمية التمييز بين كمية الحرارة ودرجاتها في دراسة ظاهرة الحرارة. يعادل ذلك في الأهمية، التمييز بين الجهد الكهربائي والشحنة الكهربائية. ويتضح الفرق بين هاتين الفكرتين من التناظر الآتي:

الجهد الكهربائي	درجة الحرارة
الشحنة الكهربائية	الحرارة

فقد يحتوي موصلان، كرتان مختلفتا الحجم مثلا، على شحنتين كهربائيتين متساويتين (أي على زيادة متساوية من أحد المائعين) ولكن جهدهما يختلف ويكون جهد الكرة الصغرى أعلى من جهد الكبرى. ستكون الكثافة السطحية للمائع على الكرة الصغرى أكبر منها على الكرة الكبرى. وحيث أن القوة الطاردة لا بد وأن تزداد بازدياد الكثافة، فإن الدرجة التي تميل بها الشحنة إلى الهروب تكون أكبر في حالة الكرة الصغرى منها في حالة الكرة الكبرى. ويدل ميل الشحنة إلى ترك الموصل على جهد هذا الموصل، ولكي نبين بوضوح الفرق بين الشحنة والجهد سنصوغ بعض العبارات التي تصف خواص الأجسام الساخنة والعبارات المناظرة في حالة الموصلات المشحونة الكهرباء.

الحرارة

إذا تلامس جسمان وكانت درجتا حرارتهما مختلفتين قبل التلامس فإنهما يصلان إلى نفس درجة الحرارة بعد فترة من الزمن. إذا كان لدينا جسمان مختلفان في السعة الحرارية وأعطينا كلا منهما مقدارا متساويا من الحرارة فإن التغير في درجتي حرارتهما يكون مختلفا.

إذا لامس ترمومتر جسما، فإنه يبين بواسطة طول عموده الزئبقي درجة حرارة الترمومتر، وبالتالي درجة حرارة الجسم.

الكهرباء

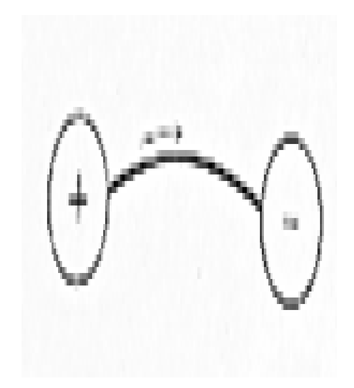
إذا تلامس موصلان وكان جهداهما قبل التلامس مختلفين فإنهما يصلان إلى نفس الجهد بعد فترة زمنية قصيرة جدا.

إذا كان لدينا جسمان مختلفان في السعة الكهربائية وأعطينا كلا منهما شحنة كهربائية متساوية فإن التغير في جهديهما يكون مختلفا.

إذا اتصل إلكتروسكوب بموصل فإنه يبين بواسطة انفراج ورقته الذهبيتين جهد نفسه الكهربائي وبالتالي الجهد الكهربائي للموصل.

ولكن يجب ألا تذهب بعيدا في هذا التناظر، والمثال الآتي يبين وجود أوجه اختلاف وأوجه تشابه بين الحرارة والكهرباء: إذا لامس جسم ساخن جسما باردا فإن الحرارة تسري من الجسم الساخن إلى الجسم البارد. نفرض أن لدينا موصلين معزولين على كل منهما شحنة متساوية الأولى موجبة والثانية سالبة. جهدا الموصلين مختلفان. حسب ما اتفق عليه، يكون جهد الموصل ذي الشحنة الموجبة أعلى من جهد الموصل ذي الشحنة السالبة. ولكن إذا وصل الموصلان بسلك فحسب نظرية المائعين الكهربائيين تتلاشى شحنة كليهما، وعلى ذلك لا يوجد فرق في الجهد الكهربائي على الإطلاق. يجب أن تتخيل "انسياب" الشحنة

الكهربائية من أحد الموصلين إلى الآخر أثناء الفترة الزمنية القصيرة التي يتلاشى فيها فرق الجهد. ولكن كيف يكون ذلك؟ هل ينساب المائع الموجب إلى الجسم السالب الشحنة، أم المائع السالب إلى الجسم الموجب الشحنة.



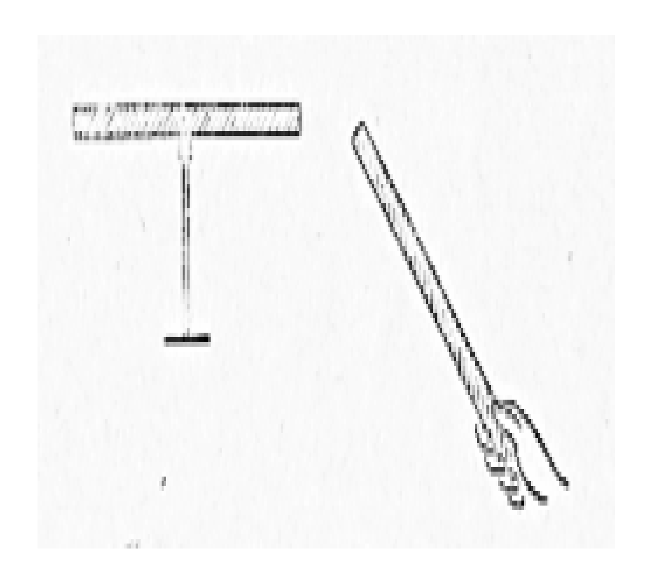
المعلومات المذكورة هنا لا تمكننا من الجزم بأحد هذين الاحتمالين أو بأن الانسياب يحدث في الاتجاهين في نفس الوقت. والمسألة ليست إلا أمرا يتفق عليه، ولا يوجد أي مغزى للاختيار لأنه لا توجد لدينا أية طريقة عملية للإجابة على هذا السؤال. وقد أجابت التطورات التالية التي أدت إلى نظرية أكثر تماسكا للكهرباء على هذا السؤال. وهذه الإجابة تبدو لا معنى لها على الإطلاق إذا صيغت بدلالة النظرية البسيطة الأولية، أي نظرية المائعين الكهربائيين. وسنفترض هنا ما يأتي: ينساب المائع الكهربائي من الموصل ذي الجهد الأعلى إلى الموصل ذي الجهد الأدنى. وعلى ذلك ففي الحالة الخاصة التي تدرسها تسري الكهرباء من الموجب إلى السالب. وهذا التعبير هو مسألة اتفاق فقط، وحتى الآن هو اختياري بحت. وتبين هذه الصعوبة أن التناظر بين الحرارة الكهرباء ليس كاملا بأي حال من الأحوال.

لقد رأينا إمكان تطبيق وجهة النظر الميكانيكية لوصف الحقائق الأولية في الكهرباء الاستكاتيكية، ونفس الشيئ ممكن في حالة الظواهر المغناطيسية.

المائعان المغناطيسيان:

سنسير هنا بنفس الطريقة السابقة، فنبدأ بحقائق بسيطة للغاية، ثم نبحث عن تفسيرها النظري.

١- لدينا قضيبان مغناطيسيان طويلان، الأول يتحرك بسهولة في مستو أفقي حول مركزه المثبت والآخر ممسوك باليد. نقرب طرفي القضيبين من بعضهما، فنلاحظ قوة جاذبة شديدة بينهما. يمكن إجراء هذه التجربة دائما. وإذا لم تلاحظ هذه القوة الجاذبية فحاول الطرف الآخر للقضيب الممسوك باليد، ولا بد أن تلاحظ هذه الظاهرة السابقة إذا كان القضيبان ممغنطين. تسمى نهايتا القضيب قطبيه. لإكمال التجربة السابقة نحرك قضيب المغناطيس الممسوك باليد على المغناطيس الآخر. نلاحظ أن قوة الجذب تتناقص إلى أن يصل القضيب إليه.. نحرك القضيب في نفس الاتجاه فإننا نشعر بقوة طاردة تصل إلى نهايتها العظمى عند القطب الثاني للمغناطيس الأفقي.



٢- تؤدي التجربة السابقة إلى تجربة أخرى. كل مغناطيس له قطبان. هل يمكن عزل أحدهما؟.. الفكرة في غاية البساطة، يكفي أن نكسر المغناطيس إلى جزئين متساويين. لقد رأينا أنه لا توجد قوة بين قطب المغناطيس الأول ومركز الثاني، ولكن النتيجة التي تحصل عليها من كسر المغناطيس غريبة وغير متوقعة. وإذا كررنا التجربة الأولى على أحد نصفي المغناطيس نحصل على نفس النتائج السابقة! يوجد الآن قطب قوي في الموضع الذي لم نلاحظ وجود أية قوة مغناطيسية عنده أولا.

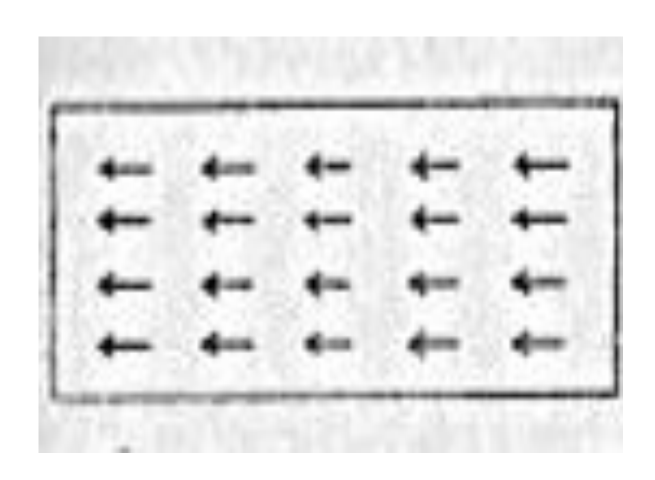
كيف تفسر هذه الحقائق؟ يمكننا أن نحاول وضع نظرية للمغناطيسية مشابهة لنظرية الكهرباء السابقة، وذلك لأن قوى الجذب والطرد تصاحب كلا من الظواهر المغناطيسية والكهربائية. نفرض أن لدينا موصلين كريين عليهما شحنتان كهربائيتان متساويتان في القيمة المطلقة

إحداهما موجبة والأخرى سالبة +٥ ، –٥ مثلا . نفرض أيضا أن قضيبا عازلا من الزجاج مثلا، يصل بين هاتين الكرتين. يمكن تمثيل هذه المجموعة بسهم متجه من الموصل ذي الشحنة السالبة إلى الموصل ذي الشحنة الموجبة.

تسمى هذه المجموعة مزدوجا كهربائيا. من الواضح أن مزدوجين كهربائيين من هذا النوع يسلكان نفس سلوك القضيبين المغناطيسيين في التجربة الأولى. وإذا نظرنا إلى هذه المجموعة على أنها تمثل مغناطيسا حقيقيا فمن الممكن أن نقول (على فرض وجود المائعين المغناطيسيين) أن المغناطيس ما هو إلا مزدوج مغناطيسي له عند نهايتيه مائعان مغناطيسيان مختلفا النوع.

نستطيع بهذه النظرية البسيطة، التي حصلنا عليها بتقليد نظرية الكهرباء، أن نفسر نتائج التجربة الأولى، نحصل من هذا التمثيل على قوة جاذبة عند أحد الطرفين وطاردة عن الآخر وعلى قوتين متساويتين ومتعادلتين عند الوسط. ولكن هل نستطيع تفسير نتائج التجربة الثانية أيضا؟.. بكسر قضيب الزجاج (في حالة المزدوج الكهربائي) نحصل على قطبين منعزلين. حسب النظرية الجديدة يجب أن نحصل على نفس النتيجة إذا كسرنا المغناطيس، ولكن النتائج التي حصلنا عليها من التجربة الثانية تخالف ذلك. يحتم علينا هذا التناقض أن نبحث عن نظرية أفضل..

بدلا من النموذج السابق، نتخيل أن المغناطيس مكون من مزدوجات مغناطيسية صغيرة جدا ولا يمكن تفرقة قطبي أي واحد منها بالكسر، واتجاه جميع هذه المزدوجات واحد هو اتجاه المغناطيس. يتضح على الفور لماذا يسبب كسر المغناطيس ظهور قطبين جديدين.. كما نرى أن هذه النظرية الجديدة توضح حقائق تجربتي ١، ٢.



وتكفي النظرية الأولى، دون إدخال أي تعديل عليها، لتفسير كثير من الحقائق. فمثلا نعلم أن المغناطيس يجذب قطع الحديد، لماذا؟ في قطعة الحديد العادية يكون المائعان المغناطيسيان ممتزجين، وعلى ذلك لا يكون لها أي تأثير مغناطيسي، وتقريب قطب موجب من قطعة الحديد يكون بمثابة "أمر بالتفريق" للمائعين، فيجذب القطب الموجب مائع الحديد السالب ويطرد الموجب. وينتج عن ذلك قوى الجذب بين المغناطيس والحديد. وإذا أبعدنا المغناطيس يعود المائعان إلى حالة تقرب من حالتهما الأولى، وتعتمد درجة اختلاف الحالتين على الدرجة

التي يتذكر بها المائعان الصوت الآمر للقوة الخارجية أي على درجة تأثرهم بالمغناطيس.

ولن نتحدث إلا قليلا عن الجانب الكمي للموضوع، إذا كان لدينا قضيبان ممغنطان طويلان فإنه يمكننا بحث تجاذب (أو تنافر) قطبيهما عندما يقترب أحدهما من الآخر. وإذا كان القضيبان طويلين بدرجة كافية، فإن تأثير القطبين البعيدين على بعضهما يكون صغيرا ويمكن إهماله. ما هي العلاقة بين قوة تجاذب أو تنافر القطبين وبين البعد بينهما؟ لقد أجابت تجربة كولوم على هذا السؤال كما يأتي:

هذه العلاقة هي كما في قانون الجاذبية لنيوتن وقانون كولوم للكهرباء الإستاتيكية.

نرى مرة أخرى في هذه النظرية تطبيقا لوجهة نظر عامة، ألا وهي: الميل إلى وصف جميع الظواهر بدلالة قوى جاذبة وطاردة تتوقف فقط على البعد بين جسيمات ثابتة لا تتغير وتؤثر بينها.

وسنشير الآن إلى حقيقة معروفة تماما، وذلك لأننا سنستعملها فيما بعد، وهي أن الأرض هي مزدوج مغناطيسي كبير، ولا يوجد أي شئ يفسر هذه الحقيقة. ويكاد ينطبق قطبا الأرض الشمالي والجنوبي على قطبيها المغناطيسيين السالب والموجب على الترتيب. وطبعا، ليست الأسماء سالب وموجب إلا مسألة اتفاق، ولكن هذه التسمية بعد الاتفاق عليها تمكننا من التمييز بين الأقطاب في أية حالة أخرى. والإبرة المغناطيسية

التي تتحرك في مستو أفقي حول منتصفها تطيع أمر القوة المغناطيسية الأرضية، فقطبها الموجب يشير نحو قطب الأرض الشمالي أي قطبها المغناطيسي السالب.

ورغم أنه يمكننا تطبيق وجهة النظر الميكانيكية باستمرار للظواهر المغناطيسية والكهربائية التي أشرنا إليها هنا، فإنه لا يوجد ما يدعو إلى الفخر أو السرور لذلك فمن المؤكد أن بعض نواحي النظرية غير مرضية إن لم تكن غير مشجعة؛ فمن الضروري للنظرية إيجاد أجسام سيالة جديدة هي المائعان الكهربائيان، المزدوجات المغناطيسية الأولية. لقد ازداد عدد الأجسام السيالة كثيرا!.

والقوى التي ظهرت بسيطة، ويمكن التعبير عن القوى المغناطيسية والكهربائية وقوى الجاذبية بنفس الطريقة. ولكننا ندفع ثمنا غاليا لهذه البساطة ألا وهو إدخال الأشياء السيالة الجديدة والعديمة الوزن. وليست هذه سوى صور مفتعلة وغير حقيقية ولا علاقة بينها وبين الأجسام الأصلية وهي المادة.

الصعوبة الجدية الأولى:

نحن الآن في حالة تسمح بذكر الصعوبة الجدية الأولى التي نشأت عن تطبيق وجهة نظرنا الفلسفية العامة، وسنثبت فيما بعد أن هذه الصعوبة وأخرى أشد منها هما السبب في تداعي الاعتقاد بإمكان تفسير جميع الظواهر ميكانيكيا.

لقد بدأ التطور العظيم في الكهرباء كفرع من فروع العلم والهندسة، باكتشاف التيار الكهربائي. ونجد هنا إحدى اللحظات القلائل في تاريخ العلم التي تلعب فيها الصدفة دورا مهما. وتروى قصة قوة ساق الضفدعة بطرق مختلفة. وبغض النظر عن التفاصيل لا يوجد أي شك في أن اكتشاف جلفاني – الذي حدث بالصدفة – قاد فولتا إلى تصميم ما يعرف ببطارية (عمود) فولتا. ولا توجد لهذه البطارية أية فائدة عملية الآن، ولكنها لا تزال تعطي مثالا بسيطا لمصدر تيار كهربائي في التجارب المدرسية وفي الكتب الدراسية. وفكرة تركيب هذه البطارية بسيطة، توجد عدة مخبارات تحتوي على ماء مضاف إليه قليل من حامض الكبريتيك وفي كل مخبار توجد قطعتان معدنيتان الأولى من النحاس والثانية من الزنك مغموستان في المحلول، ويتصل لوح النحاس في كل إناء بلوح الزنك التالي، أي أن لوح الزنك في الإناء الأول ولوح النحاس في الإناء الأخير هما اللوحان الوحيدان غير المتصلين.

يمكننا أن نستدل على وجود فرق في الجهد الكهربائي بين نحاس الإناء الأول وزنك الإناء الأخير (وذلك باستخدام إلكتروسكوب متوسط الحساسية) إذا كان عدد مكونات البطارية، أي الأوعية التي يحتوي كل منها على لوحي الزنك والنحاس، كبيرا بدرجة كافية.

لا تتميز بطارية فولتا المكونة من عدة عناصر عن أخرى مكونة من عنصر واحد إلا في سهولة قياس الكميات المتعلقة بها، وهذا هو السبب الوحيد الذي من أجله تكلمنا عن بطارية ذات عناصر كثيرة، أما فيما يلي

فعنصر واحد يكفي تماما. وجهد النحاس أعلى من جهد الزنك. واستعمال كلمة أعلى هنا يناظر استعمالها عندما نقول أن +٢ أعلى (أكبر) من –٢ . إذا اتصل موصل بلوح النحاس وآخر بالزنك فإن كلا من الموصلين يصبح مشحونا، وتكون شحنة الأول موجبة وشحنة الثاني سالبة. حتى هذه النقطة لم يظهر بعد شئ جديد يستحق الملاحظة تقريبا، ويمكننا محاولة تطبيق أفكارنا السابقة عن فرق الجهد. ولقد رأينا أن الفرق في الجهد بين أي موصلين يتلاشى إذا وصلنا بينهما بسلك، إذ بذلك ينساب مائع كهربائي من أحد الموصلين إلى الآخر. وكانت هذه العملية تشابه عملية تساوي درجتي الحرارة نتيجة لانسياب الحرارة. ولكن هل نحصل على نفس النتيجة في حالة بطارية فولتا؟ لقد كتب فولتا في تقريره يقول أن اللوحين كانت بهما نفس صفات الموصلات.

" .... ضعيفا الشحنة يعملان بدون توقف أو أن شحنتهما ترجع إلى قيمتها الأولى بعد كل تفريغ كهربائي أو بمعنى آخر سنتج عن هذا شحنة منتهية أو فعلا دائما ينتج – عنه المائع الكهربائي".

والنتيجة الغريبة لهذه التجربة أن فرق الجهد بين لوحي النحاس والزنك لا يتلاشى كما في حالة موصلين مشحونين ومتصلين بسلك بل يوجد فرق الجهد باستمرار وحسب نظرية الموائع الكهربائية، لا بد وأن يسبب هذا الفرق في الجهد انسيابا مستمرا للمائع الكهربائي من الموصل ذي الجهد العالي (لوح النحاس) إلى الموصل ذي الجد الأدنى (لوح الزنك).

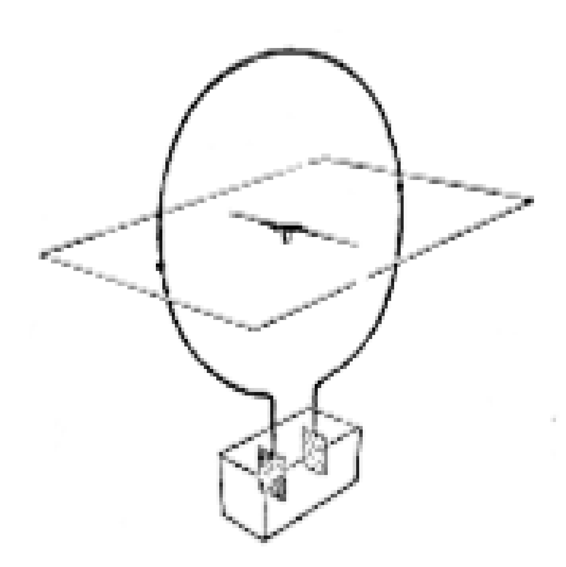
لكي نحافظ على نظرية الموائع الكهربائية من الانهيار فنفترض وجود قوة ما ثابتة يؤثر فتوجد فرق الجهد وتسبب انسياب المائع الكهربائي، ولكن الظاهرة كلها مدهشة من ناحية الطاقة إذ تتولد كمية ملحوظة من الحرارة في السلك الذي يحمل التيار لدرجة أن هذا السلك ينصهر إذا كان رفيعا. وعلى ذلك تتولد طاقة حرارية في السلك، ولكن بطارية فولتا كلها تكون مجموعة مقفلة وذلك لعدم وجود أي مصدر خارجي للطاقة.

وإذا أردنا أن نحفظ قانون بقاء الطاقة من التداعي، يجب علينا أن نبحث أين يحدث التحويل وعلى حساب ماذا تتولد الحرارة. لا يصعب التحقق من وجود عمليات كيميائية معقدة في البطارية، والمواد التي تتفاعل في هذه العمليات هي الزنك والنحاس والسائل المغموسين فيه وهذه هي الكيفية التي تتحول بها الطاقة: طاقة كيميائية ---> طاقة المائع المنساب أي التيار الكهربائي ----> حرارة. ونتيجة للتغيرات الكيميائية التي تصاحب انسياب الكهرباء تصبح بطارية فولتا غير صالحة للاستعمال بمضي الوقت.

والتجربة التي كشفت فعلا عن الصعوبات الكبرى في تطبيق الأفكار الميكانيكية لا بد وأن تبدو غريبة على أي شخص يسمع عنها للمرة الأولى، وقد أجرى أورستن هذه التجربة منذ مائة وعشرين عاما، وجاء في تقريره ما يأتي: "يمكن البرهنة بهذه التجارب على أن الإبرة المغناطيسية تحركت نتيجة لجهاز جلفاني، وذلك عندما أقفلت الدائرة

الجلفانية وليس عند فتحها، كما حاول بعض علماء الطبيعة الأفذاذ دون جدوى منذ عدة سنين مضت".

نفرض أن لدينا بطارية فولتا وسلك موصل. إذا وصلنا السلك إلى لوح النحاس فقط فإنه يوجد فرق في الجهد ولكن لا يوجد تيار. نفرض أن السلك ثني بحيث يكون دائرة، وأنه توجد إبرة مغناطيسية عند مركز السلك وفي مستواه. لا يحدث أي شيء مادام السلك لا يمس لوح الزنك. لا توجد أية قوة مؤثرة، أي أن فرق الجهد ليس له أي تأثير على وضع الإبرة. إن من الصعب فهم لماذا توقع بعض "علماء الطبيعة الأفذاذ" كما سماهم أورستد، مثل هذا التأثير.



لنصل السلك الآن بلوح الزنك. يحدث شئ غريب على الفور. تدور الإبرة المغناطيسية وتأخذ وضعا مخالفا لوضعها الأول. وإذا كان

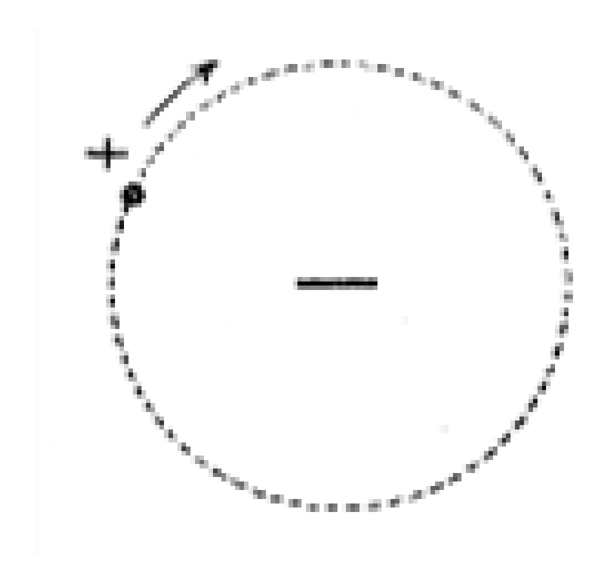
هذا الكتاب فوق مستوى السلك فإن أحد قطبي الإبرة يشير الآن إلى القارئ. والذي نلاحظه هو تأثير قوة على القطب المغناطيسي. وتؤثر هذه القوة في اتجاه عمودي على الدائرة. وبعد مواجهة حقائق هذه التجربة يصعب أن نتحاشى استنتاج اتجاه القوة المؤثرة.

هذه التجربة جديرة بالاهتمام لأنها تبين العلاقة بين ظاهرتين مختلفتين هما: المغناطيسية، والتيار الكهربائي. ويوجد سبب آخر أقوى لأهمية هذه التجربة: لا يمكن أن تقع القوة التي تعمل بين القطب المغناطيسي والأجزاء الصغيرة للسلك الذي يمر فيه التيار على الخطوط الواصلة بين الإبرة والسلك، أي لا يمكن أن تكون خطوط عمل القوة هي الخطوط الواصلة بين المزدوجة المغناطيسية الأولية وبين جسيمات التيار المنساب؛ فالقوة عمودية على هذه النظرة الميكانيكية، أن ننسب إليها جميع الأحداث في العالم الخارجي. ونحن نذكر أن قوة الجاذبية والقوى المغناطيسية والكهربائية تتبع قانوني نيوتن وكولوم وتؤثر في المستقيم الواصل بين الجسمين المتجاذبين (أو المتنافرين).

وقد زادت هذه الصعوبة وضوحا بتجربة أجراها رولاند بمهارة منذ ستين عاما. وإذا تركنا التفاصيل الفنية جانبا فإنه يمكن وصف هذه التجربة كما يلي: تخيل كرة صغيرة مشحونة بالكهرباء. تخيل أيضا أن هذه الكرة تتحرك بسرعة كبيرة في دائرة يوجد عند مركزها إبرة مغناطيسية. أساس هذه التجربة هو نفس أساس تجربة أورستد والفرق الوحيد هو أننا نستعيض عن التيار بحركة ميكانيكية للشحنة الكهربائية.

وجد رولاند أن النتيجة تشابه النتيجة التي نحصل عليها عندما يمر تيار في سلك دائري أي أن المغناطيس ينحرف بتأثير قوة عمودية.

لنفرض الآن أن الشحنة تتحرك بسرعة أكبر. نتيجة لذلك تزداد القوة التي تؤثر على القطب المغناطيسي، وبذلك يزداد الانحراف عن الوضع الأصلي. تبين هذه النتيجة صعوبة أخرى؛ ففضلا عن أن القوة لا تؤثر في الخط الواصل بين الشحنة والمغناطيس فإن شدتها تتوقف على سرعة الشحنة. لقد بنيت وجهة النظر الميكانيكية جميعها على الاعتقاد بأن جميع الظواهر يمكن تفسيرها بدلالة قوى تتوقف على البعد فقط وليس على السرعة. ومن المؤكد أن نتيجة تجربة رولاند تزعزع هذا الاعتقاد. ومع ذلك فربما نكون من المحافظين ونحاول أن نبحث عن حل لا يتعارض مع المبادئ السابقة.



كثيرا ما تنشأ في العلم صعوبات مفاجئة وغير منتظرة مثل الصعوبات السابقة، وهي تضع بذلك عقبات في طريق التطور الناجح لنظرية ما. وفي بعض الأحيان يبدو أن إدخال تعميم بسيط على الأفكار القديمة قد يخلصنا من هذه الصعوبات ولو بصفة مؤقتة؛ فمثلا قد يبدو في الحالة الحاضرة أن تدخل قوى أخرى عامة تؤثر على الجسيمات الصغيرة. ومع ذلك فكثيرا ما يصعب ترقيع نظرية قديمة، وتؤدي الصعوبات إلى القضاء على النظرية القديمة ونشأة أخرى جديدة. ولم يكن سلوك الإبرة المغناطيسية هو العامل الوحيد في سقوط النظريات الميكانيكية التي كانت تبدو ناجحة وذات أساس متين؛ فقد ظهر هجوم شديد آخر من ناحية أخرى مختلفة تماما، ولكن هذه قصة أخرى سنقصها فيما بعد.

سرعة الضوء:

في كتاب "علمان جديدان" لجاليليو، محادثة بين الأستاذ وتلاميذه موضوعها سرعة الضوء:

ساجريدو: ولكن ما هو نوع سرعة الضوء هذه وبأية درجة هي كبيرة؟، هل هي آنية أم لحظية أم تحتاج إلى وقت مثل أية حركة أخرى؟ وهل يمكن تحديد الإجابة على هذه الأسئلة بالتجربة؟

سيميليكو: تبين جميع المشاهدات اليومية في الحياة العملية أن انتشار الضوء آن، وذلك لأننا نرى لهب قديفة المدفع على بعد كبير

دون مضي أي وقت، ولكن دويها لا يصل إلى الأذن إلا بعد فترة زمنية ملحوظة.

ساجريدو: حسنا يا سمبليكو. النتيجة الوحيدة التي يمكنني استنتاجها من هذه التجربة المألوفة هي أن صوت القذيفة يصل إلى الأذن بسرعة أصغر من التي يصل بها الضوء إلى العين، ولكنها لا تبين ماذا كان وصول الضوء آن أم أنه يحتاج إلى وقت رغم أنه سريع جدا..

سالڤاني: لقد قادتني النتائج البسيطة لهذه المشاهدات، وما ماثلها إلى تصميم طريقة يمكن بواسطتها التأكد مما إذا كانت آنية حقا..

ويأخذ سالڤاني في شرح طريقة تجربته، ولكي نفهم فكرته سنفرض أن سرعة الضوء صغيرة، فضلا عن فرضنا أنها محدودة، أي أننا سنفترض أن حركة الضوء قد أبطئت مثل حركة سينمائي بطئ. رجلان أ، ب يحمل كل منهما مصباحا مغطى ويقفان على بعد ميل من بعضهما. يضئ الرجل الأول أ مصباحه. لقد اتفق الرجلان على أن يضئ ب مصباحه عند اللحظة التي يرى فيها ضوء مصباح أ. لنفرض في "حركتنا البطيئة" أن الضوء يسير مسافة قدرها ميل في الثانية الواحدة. يرسل أ إشارته برفع الغطاء عن مصباحه. يرى ب هذه الإشارة بعد مرور ثانية واحدة ويجيبها برفع الغطاء عن مصباحه. ولا تصل إشارة ب إلى أ إلا بعد مرور ثانيتين من إعطائه (أي أ) إشارته. أي أنه إذا كان الضوء يسير بسرعة ميل في الثانية فإنه يتحتم أن تمضي ثانيتان بين اللحظة التي يرسل فيها أ إشارته

واللحظة التي يرى فيها إشارة ب، على فرض أن ب يبعد عن أ مسافة قدرها ميل واحد. وبالعكس إذا كان أ يجهل سرعة الضوء ولكنه يفترض أن زميله قد حافظ على الاتفاق السابق وإذا رأي إشارة ب بعد ثانيتين من إرسال إشارته فإنه يستنتج أن الضوء يسير بسرعة ميل في الثانية.

وكان احتمال استطاعة جاليليو تعيين سرعة الضوء بهذه الطريقة ضعيفا جدا، وذلك لسوء حالة الوسائل والأجهزة اللازمة للتجارب العملية في ذلك الوقت. ولو كانت المسافة ميلا واحدا لوجب عليه أن يقيس فترات زمنية صغيرة مثل ١\١٠٥ من الثانية!!

ولقد صاغ جاليليو مسألة تعيين سرعة الضوء ولكنه لم يحلها. وفي أغلب الأحيان تكون صياغة السؤال أهم من حله، فقد لا يعتمد الحل إلا على مهارة رياضية أو تجريبية. وتحتاج صياغة الأسئلة الجديدة أو إثارة الاحتمالات الجديدة أو النظر إلى المسائل القديمة من وجهة نظر جديدة إلى خيال ممتاز وتفكير مبدع، وهي تسجل تقدما حقيقيا للعلم بالتفكير في تجارب وظواهر معلومة تفكيرا جديدا والنظر إليها من وجهات أخرى حصلنا على قاعدة القصور الذاتي وقانون بقاء الطاقة. وسيجد القارئ في الصفحات التالية أمثلة عديدة من هذا النوع حيث تبدو أهمية النظر في الحقائق المعروفة من وجهة نظر جديدة، وحيث بذلك تنشأ نظريات جديدة.

نعود الآن إلى المشكلة السهلة نسبيا ألا وهي تعيين سرعة الضوء. إن من الغريب حقا أن جاليليو لم يدرك أن من الممكن أن يقوم رجل واحد بإجراء هذه التجربة بسهولة ودقة؛ ففي استطاعة الرجل استعمال مرآة في نفس المكان الذي يقف فيه زميله بدلا من هذا الزميل. بالمرآة تبعد الإشارة أوتوماتيكيا بمجرد وصولها.

وبعد حوالي مائتين وخمسين عاما نفذ "فيزو" نفس هذه الفكرة، وهو أول من عين سرعة الضوء بتجارب أجريت على سطح الكرة الأرضية. ولقد عين "رومر" سرعة الضوء قبل "فيزو" بكثير باستخدام مشاهدات فلكية، ولكن النتيجة التي حصل عليها "فيزو" أدق من التي حصل عليها "رومر".

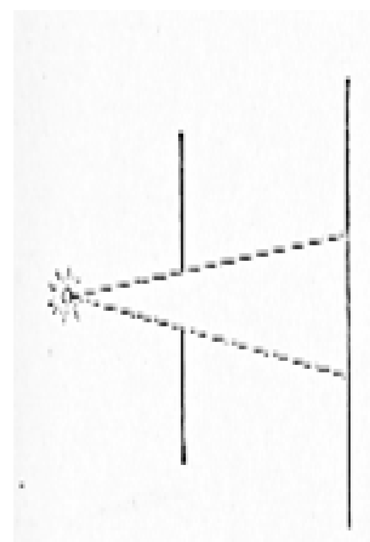
من الواضح أنه نتيجة لكبر سرعة الضوء الهائل، تلزم لقياسها مسافات كبيرة يمكن مقارنتها بالبعد بين الأرض وأحد كواكب المجموعة الشمسية مثلا، أو باستعمال أجهزة علمية بعد تحسينها وزيادة درجة دقتها عين العدد الكبير الذي يمثل سرعة الضوء عدة مرات بعد هاتين التجربتين، وكانت درجة الدقة تزداد كل مرة. وقد اخترع ميكلسون طريقة دقيقة للغاية لتعيين سرعة الضوء في القرن الحالي. ويمكن التعبير عن نتيجة هذه التجارب كما يأتي: سرعة الضوء في الفراغ تساوي: ١٨٦٠٠٠ميل في الثانية تقريبا أو ٣٠٠٠٠٠ كيلو متر في الثانية.

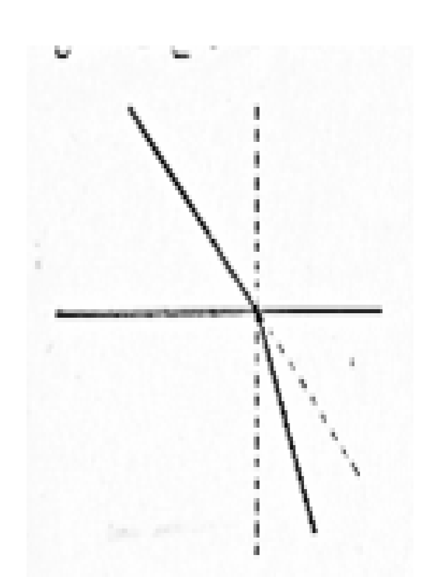
النظرية الجسيمية للضوء:

مرة أخرى نبدأ ببعض الحقائق العملية. العدد الذي أعطيناه فيما سبق سرعة الضوء في القضاء الخيالي. إذا لم يقابل الضوء عقبات فإنه يسير في القضاء الخالي بهذه السرعة. والملاحظ أننا نستطيع الرؤية خلال وعاء زجاجي مفرغ من الهواء كما يمكننا رؤية الكواكب والنجوم والسدم رغم أن الضوء يصل إلينا من هذه الأجسام مخترقا الأثير. وإن إمكان الرؤية خلال وعاء زجاجي سواء أكان بها هواء أم لا، ليبين أن وجود الهواء لا أثر له؛ ولهذا السبب يمكننا إجراء التجارب الضوئية في حجرة عادية كما لو كانت مفرغة من الهواء دون أن يؤثر ذلك في النتيجة.

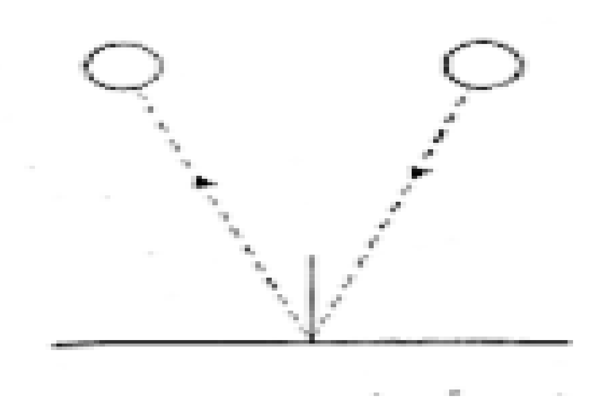
وإحدى الحقائق الضوئية البسيطة هي أن الضوء يسير في خطوط مستقيمة. وسنصف تجربة أولية بسيطة توضح ذلك. توضح ستارة بها ثقب أمام نقطة ضوئية. والنقطة الضوئية هي مصدر ضوئي صغيرا جدا مثل فتحة صغيرة في غطاء مصباح. وإذا كان هناك حائط على بعد من الستارة فإن الثقب الموجود فيما يظهر على الحائط كدائرة مضيئة وسط ظلام، والرسم التالي يبين العلاقة بين هذه الظاهرة وبين سير الضوء في خطوط مستقيمة. ويمكن بفرض أن الضوء يسير في الفراغ أو في الهواء في خطوط مستقيمة تفسير جميع الظواهر المشابهة التي يظهر فيها الضوء والظل وأشباه الظلام.

لنعتبر الآن مثالا آخر، وهو عندما يسير الضوء خلال مادة، نفرض أن لدينا شعاعا ضوئيا يتحرك في الفراغ ويقابل سطحا من الزجاج، ولنتساءل: ماذا يحدث في هذه الحالة؟.. والجواب أنه إذا كانت قاعدة سير الضوء في خطوط مستقيمة صحيحة أيضا في هذه الحالة فإن مسار الشعاع يكون ممثلا بالخط المتقطع وفي الواقع أن المسار ليس كذلك. يوجد انكسار في المسار كما هو موضح في الشكل، والذي تشاهده هو في الواقع الظاهرة المسماة بالانكسار. إذا غمست عصاة في ماء فإنها تظهر كأنها مثنية عند وسطها، وليست هذه سوى إحدى صور الانكسار العديدة.





تبين هذه الحقائق أن في الإمكان تكوين نظرية ميكانيكية بسيطة للضوء، وغرضنا هنا هو أن نبين كيف وجدت المسميات "السيال، والجسيمات والقوى" طريقها إلى مجال الضوء وكيف انهارت الفكرة الفلسفية القديمة في النهاية؟. وتظهر النظرية هنا في صورة بدائية بسيطة. لنفرض أن جميع الأجسام المضيئة تشع جسيمات تقابل العين فتولد إحساسا للضوء. ولقد تعودنا إذا لزم الأمر أن ندخل أنواعا جديدة من المادة للحصول على تفسير ميكانيكي، وعلى ذلك فإننا سنقوم بذلك هنا دون تردد. في الفراغ الخالي لا بد وأن تتحرك هذه الجسيمات في خطوط مستقيمة بسرعة معلومة. وبذلك تصل إلى العين رسالة من الأجسام المشعة. وجميع الظواهر التي تنتج عن سير الضوء في خطوط متسقيمة تؤيد نظرية الجسيمات، وذلك لأن هذا النوع من الحركة بالذات قد أدخل خصيصاً للجسيمات. والنظرية تفسر أيضاً وبسهولة انعاكس الضوء على المرايا كما هو مشاهد في التجربة الميكانيكية التي يلقى فيها بكرات مرنة على حائط والرسم التالى يوضح ذلك.



وتفسير ظاهرة الانكسار أصعب من ذلك بقليل. وسنبين إمكان التفسير الميكانيكي دون الدخول في التفصيلات. إذا سقطت الجسيمات على سطح من الزجاج مثلا، فربما تؤثر عليها جزيئات المادة بقوة تؤثر (مع غرابة ذلك) في الجوار المباشر للمادة فقط. وكما نعلم، كل قوة على نقطة متحركة تغير سرعتها. وإذا كانت القوة المحصلة التي تؤثر على جسيمات الضوء هي قوة جاذبة عمودية على سطح الزجاج، فإن خط الحركة الجديد يكون واقعا بين خط الحركة الأول وبين العمودي على السطح. يبدو أن هذا التفسير يؤيد نظرية الجسيمات للضوء. ومع ذلك فلتحديد فائدة هذه النظرية ومدى صحتها، يتحتم علينا أن ندرس حقائق جديدة أكثر تعقيدا.

لغز اللون:

مرة أخرى كانت عبقرية نيوتن هي التي فسرت لأول مرة كثرة الألوان في سكون، وفيما يلي نقتبس عن نيوتن وصفا لإحدى تجاربه:

"في عام ١٦٦٦ (وهو الوقت الذي اشتعلت فيه بصقل زجاجات ضوئية ذات سطح غير كري) استعملت منشورا ثلاثيا من الزجاج لدراسة ظاهرة الألوان المشهورة. وقد أظلمت حجرتي وقمت بعمل ثقب صغير في النافذة، وذلك لأحصل على كمية مناسبة من ضوء الشمس. وقد

وضعت المنشور عند المصدر بحيث ينكسر الضوء ويصل الى الحائط المقابل. ولقد سررت للضوء المنكسر الناتج ذي الألوان الزاهية القوية" .

وضوء الشمس "أبيض" ولكن بعد المرور خلال المنشور يتحول ضوء الشمس "الأبيض" إلى جميع الألوان الموجودة في الكون. والطبيعة نفسها تعطينا نفس النتيجة في قوس قزح الجميل. ومنذ قديم الأزل توجد محاولات لتفسير هذه الظاهرة، والعقبة الموجودة في الإنجيل التي تقول بأن قوس قزح هو توقيع الله على معاهدة مع الإنسان هي «نظرية» من وجهة نظر معينة، ولكنها لا تفسر لماذا يتكرر قوس قزح من وقت لآخر عند المطر. ونيوتن هو أول من عالج لغز اللون بأكمله، وبطريقة علمية كما أشار إلى حله في عمله العظيم.

يكون أحد حدي قوس قزح دائما أحمر، بينما يكون الآخر بنفسجيا، وبين هذين اللونين توجد جميع الألوان الأخرى بترتيب معين. وتفسير نيوتن لهذه الظاهرة هو ما يأتي: توجد جميع الألوان فعلا في الضوء الأبيض. هذه الألوان تنتقل جميعا بين الكواكب وفي الجو متحدة ببعضها فيكون لها تأثير الضوء الأبيض، ويمكننا أن تقول أن الضوء الأبيض هو مزيج من جسيمات مختلفة تناظر ألوانا مختلفة. وفي التجربة التي أجراها نيوتن، يشتت المنشور هذه الألوان المختلفة في الفضاء. حسب النظرية الميكانيكية للضوء يكون السبب في الانكسار هو قوى تنتج عن جزيئات الزجاج وتؤثر على جسيمات الضوء. وتختلف القوى التي تؤثر على الجسيمات التي ننتسب إلى الألوان المختلفة، فتكون

أشد ما يمكن للون البنفسجي وأضعف ما يمكن للون الأحمر. وعلى ذلك تأخذ الألوان المختلفة مسارات مختلفة بعد انكسارها وتتفرق عندما يترك الضوء المنشور، وفي حالة قوس قزح تقوم قطرات الماء بعمل المنشور.

لقد أخذت النظرية الجسيمية للضوء صورة أكثر تعقيدا من صورتها الأولى، فبدلا من نوع واحد فقط لدينا الآن أنواع مختلفة من الضوء الجسيمي، وكل نوع له لون معين. ومع ذلك فيجب إذا كانت هذه النظرية صحيحة أن تتفق نتائجها مع المشاهدات: ضوء منتظم ذو لون أصفر، ويكون من الأنسب في أغلب الأحيان إجراء بعض التجارب الضوئية باستعمال ضوء منتظم وذلك لأن النتيجة – كما ننتظر – تكون أبسط كثيرا.

لنفرض الآن فرضا غريبا، وهو أن الشمس قد بدأت فجأة تشع ضوءا منتظما ذا لون معين، أصفر مثلا، نتيجة لذلك تختفي جميع الألوان الموجودة في الكون عدا اللون الأصفر، ويكون لون أي جسم إما أصفر أو أسودا!. وليس هذا إلا نتيجة للنظرية الجسيمية للضوء لأنه لا يمكن الحصول على ألوان جديدة من الضوء المنتظم. ويمكن التحقق من صحة ذلك بالتجربة، إذا وضعنا قطعة صوديوم ساخنة جدا في حجرة مظلمة فإن لون أي شئ في هذه الحجرة يكون إما أصفر أو أسود، والواقع أن اختلاف الألوان في الكون يدل على كثرة الألوان التي تكون الضوء الأبيض.

يبدو أن النظرية الجسيمية للضوء تنجح في شرح جميع هذه الحالات تماما، رغم أن إدخال أنواع جديدة من الجسيمات بعدد الألوان المختلفة يضايق بعض الشيئ. ويبدو أيضا الفرض بأن جميع جسيمات الضوء تسير بنفس السرعة فرضا متكلفا وغير حقيقي.

ويمكننا أن نتخيل أن النظرية مختلفة تمام الاختلاف ومبنية على مجموعة من الفروض الأخرى قد تعطي التفسيرات المطلوبة ولا تجد ما يعارضها. وفي الواقع أننا سنشهد في القريب العاجل نشأة نظرية أخرى مبنية على أفكار مختلفة تماما عن الأفكار السابقة وبالرغم من ذلك فإنها تفسر نفس مجموعة الظواهر الضوئية التي فسرتها النظرية السابقة. وقبل صياغة الفروض التي تعتمد عليها النظرية الجديدة يتحتم علينا أن نجيب على سؤال بتعلق بهذه الاعتبارات الضوئية. يجب علينا أن نعود إلى الميكانيكا ونسأل: ما هي الموجة؟

إذا نشأت إشاعة في لندن فإنها تصل إلى أدنبرة بسرعة رغم عدم انتقال أي شخص ممن في نشرها بين هاتين المدينتين. تصادفنا الآن حركتان مختلفتان: حركة الإشاعة من لندن إلى أدنبرة، وحركة الأشخاص الذين ينشرونها عبر الحقل كله. مرة ثانية يجب علينا أن نميز بين حركة الموجة وحركة سنابل القمح المختلفة التي لا تعاني إلا ذبذبات صغيرة.

كلنا قد رأينا الموجات التي تنتشر في دوائر تتسع تدريجيا عند إلقاء الحجر في بركة ماء. حركة الموجة تختلف تماما عن حركة

جسيمات الماء. الجسيمات ترتفع وتنخفض فقط. والحركة الموجية التي نشاهدها هي حركة حالة من حالات المادة وليست حركة المادة نفسها. ويتضح ذلك تماما من حركة قطعة من الفلين طافية فوق الماء فهي تعلو وتنخفض فقط تبعا لحركة الماء بدلا من أن تسير مع الموجة. ولكي نفهم التركيب الميكانيكي للموجة، سنعتبر تجربة مثالية أخرى.

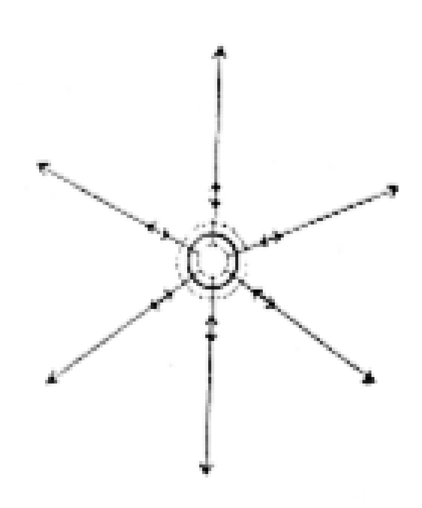
نفرض أن فراغا كبيرا مملوءا بانتظام بالماء أو الهواء أو أي وسط آخر، وأنه توجد كرة في متوسط من هذا الفراغ. لنفرض أنه عند بدء التجربة لا توجد حركة على الإطلاق، وفجأة تبدأ الكرة في "التنفس" توافقيا، فيزداد حجمها وينقص رغم احتفاظها بشكلها الكري. ترى ماذا يحدث في الوسط الموجودة فيه الكرة نتيجة لهذه الحركة؟

نبدأ دراستنا في اللحظة التي تبدأ فيها الكرة في التمدد. تدفع جزيئات الوسط الموجودة في الجوار المباشر للكرة بعيدا، وعلى ذلك تزداد كثافة قشرة كروية من الماء (أو الهواء) عن قيمتها العادية. بالمثل، عندما تنقبض الكرة تصغر كثافة جزء الماء الذي يلي المحيط مباشرة. وتنتشر هذه التغيرات في الكثافة خلال الوسط كله. وتعمل الجسيمات المكونة للوسط ذبذبات صغيرة فقط، ولكن الحركة الناتجة جميعها هي حركة موجة تقدمية. والشيئ الأساسي هنا، هو أننا نعتبر لأول مرة حركة شيئ ليس بمادة، وإنما هو طاقة منقولة خلال المادة باستعمال مثال الكرة النابضة يمكننا إدخال فكرتين طبيعيتين عامتين.

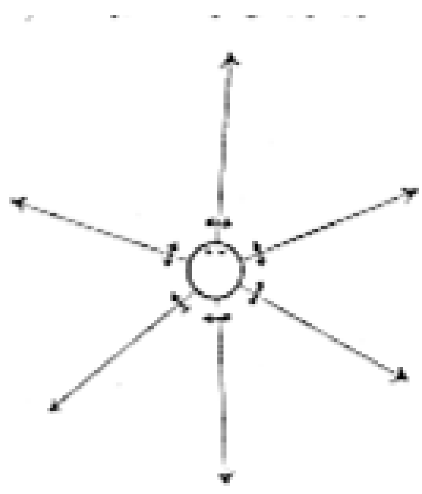
الفكرة الأولى هي السرعة التي تتحرك بها الموجة. تتوقف هذه السرعة على الوسط فتختلف في الماء عنها في الهواء مثلا. والفكرة الثانية هي طول الموجة. في حالة الأمواج التي تنشأ على سطح بحر أو نهر يكون طول الموجة هو البعد بين قمتي موجتين متتاليتين أو البعد بين قاعي موجتين متتاليتين. وعلى ذلك يكون طول الموجة في حالة موجات البحر أكبر من طول الموجة في حالة موجات النهر. وفي حالة الموجات التي تحدث نتيجة للكرة النابضة يكون طول الموجة هو البعد – عند لحظة معينة – بين قشرتين كرويتين متجاورتين كثافتهما إما نهاية عظمى أو نهاية صغرى. من الواضح أن هذا الطول كما يتوقف على الوسط يتوقف أيضا على معدل نبض الكرة، فإذا كان نبض الكرة سريعا فإن طول الموجة يقصر، وإذا كان نبض الكرة بطيئا فإن طول الموجة يزداد.

لقد أحرزت فكرة الموجة هذه نجاحا كبيرا في علم الطبيعة، ومن المؤكد أنها فكرة ميكانيكية هذه الجسيمات المادة. وعلى ذلك يمكن على العموم اعتبار أية نظرية تستخدم فيها فكرة الموجة نظرية ميكانيكية. فمثلا أساس تفسير الظواهر الصوتية هو هذه الفكرة؛ فالأجسام المتذبذبة – مثل الأوتار الصوتية وأوتار القيثارة – هي مصادر للموجات الصوتية التي تنتشر في الهواء بنفس الطريقة التي شرحناها في حالة الكرة النابضة. وعلى ذلك يمكننا أن نضم جميع الظواهر الصوتية إلى الميكانيكا باستعمال فكرة الموجة.

لقد وضحنا أنه يجب التميز بين حركة الجسيمات وبين حركة الموجة نفسها التي هي حالة للوسط. ورغم أن الحركتين مختلفتان فإنه من الواضح في مثال الكرة النابضة أن الحركتين تكونان في نفس المستقيم. تتذبذب جسيمات الوسط في أجزاء صغيرة خطية، وتزداد الكثافة وتنقص دوريا مع هذه الحركة. والاتجاه الذي تنتشر فيه الموجة هو نفس الخط الذي تقع عليه الذبذبات. ويسمى هذا النوع من الموجات موجات طولية. ولكن هل هذا هو النوع الوحيد من الموجات؟ من المهم لدراستنا التالية أن ندرك إمكان وجود نوع آخر من الموجات يسمى بالموجات المستعرضة.



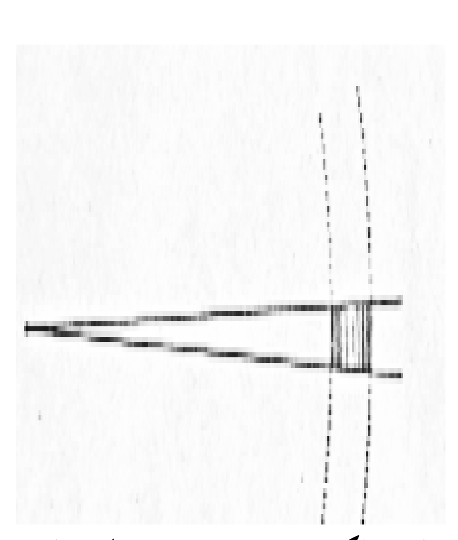
فلنغير مثالنا السابق. نغمس الكرة هذه المرة في وسط من نوع آخر، مثلا الغراء بدلا من الماء أو الهواء. وبدلا من أن تنبض الكرة سنجعلها تدور زاوية صغيرة في اتجاه واحد ثم تعود ثانية على أن تكون الحركة توافقية دائما وحول محور معين. يلتصق الغراء بالكرة،



وعلى ذلك تجبر أجزاء الغراء الملتصقة على أن تقلد الحركة، وهذه الأجزاء تجبر كذلك الأجزاء الموجودة على بعد صغير منها على أن تقلد نفس الحركة، وهكذا. بذلك تتكون موجة في الوسط، وإذا تذكرنا التميز بين حركة الوسط وحركة الموجة فإننا نرى أنهما لا يقفان على نفس الخط في هذه الحالة. تنتقل الموجة في اتجاه نصف قطر الكرة بينما يتحرك الوسط عموديا على هذا الاتجاه. بذلك تكون موجة مستعرضة قد تولدت.. والموجات التي تنتشر على سطح الماء هي موجات مستعرضة، إذ أنه بينما تنتشر الموجة في مستو أفقي، تتحرك قطعة من الفلين طافية رأسيا إلى أعلى وإلى أسفل. أما الموجات الصوتية فهي أكثر الأمثلة المألوفة للموجات الطولية.

وثمة ملاحظة أخرى أخيرة: الموجة الناتجة عن كرة نابضة أو متذبذبة هي موجة كرية، وسبب هذه التسمية هو أنه عند أي لحظة معينة تسلك جميع النقط الموجودة على سطح كرة محيطة بمصدر الموجة نفس السلوك. لنعتبر قطعة من كرة مثل هذه على بعد كبير من المصدر. كلما كانت القطعة صغيرة وبعيدة كلما كانت تشبه قطعة مستوية، ويمكننا أن نقول دون أن ندعي درجة كبيرة في الدقة، أنه لا يوجد فرق أساسي بين قطعة مستوية وبين قطعة من كرة نصف قطرها كبير جدا، وفي كثير من الأحيان تسمى الأجزاء الصغيرة من موجات كرية بعيدة جدا عن المصدر موجات مستوية.

وكلما كان الجزء المظلل في الرسم بعيدا عن المركز والزاوية المحصورة بين نصفي القطرين صغيرة، كلما كان تمثيل الموجة المستوية أفضل. وفكرة الموجة المستوية، مثل كثير من الأفكار الطبيعية الأخرى، ليست إلا خيالا يمكن تحقيقه إلى درجة محدودة من الدقة فقط، ومع ذلك فهي فكرة مفيدة سنحتاج إليها فيما بعد.



النظرية الموجية للضوء:

دعنا نتذكر لماذا توقفنا عن وصف الظواهر البصرية. كان غرضنا هو إدخال نظرية جديدة للضوء تختلف عن نظرية الجسيمات، ولكنها تفسر الحقائق التي سبق ذكرها. وللقيام بذلك، اضطررنا إلى أن نقطع قصتنا وندخل فكرة الموجات. والآن يمكننا أن نعود إلى هذا الموضوع.

وكان هيجنز – أحد معاصري نيوتن – هو الذي وضع نظرية جديدة تماما للضوء، وقد كتب هيجنز في مؤلفه عن الضوء يقول: "وإذا كان الضوء يستغرق وقتا لانتقاله (وهي المسألة التي سنبحثها الآن) فإنه ينتج أن هذه الحركة – الدخيلة على مادة الوسط – متوالية وعلى ذلك فهي

تنتشر على هيئة سطوح كرية مثل الموجات الصوتية. وأنا أسميها موجات، للتشابه الموجود بينها وبين الموجات التي تتكون في الماء عندما يلقى حجر فيه، والتي تنتشر على هيئة دوائر متتالية رغم أن الموجات في الحالة الأخيرة توجد جميعها في مستو واحد".

وفي رأي هيجنز أن الضوء هو موجة، أي هو انتقال للطاقة لا للمادة. ولقد رأينا أن نظرية الجسيمات تفسر كثيرا من الحقائق المشاهدة. هل تؤدي النظرية الموجية نفس المهمة؟ يجب أن نسأل نفس الأسئلة التي أجيب عليها بواسطة نظرية الجسيمات، وذلك لكي نرى هل يمكن الإجابة عليها بواسطة النظرية الموجية أيضا. وسنفعل ذلك هنا في صورة حوار بين ن، ﻫ حيث ن شخص يعتقد بصحة نظرية نيوتن، ﻫ شخص يعتقد بصحة نظرية هيجنز. ولن يستعمل أيهما أي نتائج حصل عليها بعد انتهاء عمل هذين العالمين الفذين:

ن – في نظرية الجسيمات يوجد معنى محددا تماما لسرعة الضوء، فهي السرعة التي تسير بها الجسيمات في الفراغ المطلق. ولكن ماذا تعني بسرعة الضوء في النظرية الموجية؟

ﻫ – في النظرية الموجية تكون سرعة الضوء هي سرعة موجة الضوء، فمن المعلوم أن كل موجة تنتشر بسرعة معينة. وهذا يسري على موجة الضوء أيضا.

ن – رغم أن هذا الكلام يبدو بسيطا فهو ليس كذلك؛ فموجات الصوت تسير في الهواء، وموجات المحيط تسير في الماء، ولا بد لكل موجة من وسط مادي تسير فيه ولكن الضوء يسير في الفراغ المطلق رغم عدم إمكان سير الصوت فيه. وفي الواقع أن فرض سير الموجة في الفراغ المطلق يعني عدم فرض وجود موجات على الإطلاق.

هـ – نعم هذه صعوبة ولكنها ليست جديدة عليّ. لقد فكر أستاذي فيها جيدا ووجد أن الطريقة الوحيدة للتخلص من هذه الصعوبة، هو: نفرض وجود شئ مادي "الأثير" شفاف وينفذ خلال الكون كله. وبمجرد أن توجد لدينا الشجاعة لإدخال هذه الفكرة فإن كل شئ آخر يصبح واضحا ومقنعا.

ن – ولكني أعترض على مثل هذا الفرض؛ فأولا بهذا الفرض ندخل شيئا ماديا جديدا مع أن لدينا كثيرا من هذه الأشياء في علم الطبيعة. ويوجد سبب آخر للاعتراض؛ فأنت دون شك تعتقد بوجود تفسير كل شئ بدلالة الميكانيكا، ولكن ماذا عن الأثير؟ هل يمكن الإجابة على السؤال البسيط الآتي: كيف يتركب الأثير من جسيمات صغيرة أولية وكيف يظهر في الظواهر الأخرى؟

هـ – من المؤكد أن اعتراضك الأول وجيه. ولكن فإدخال الأثير الذي لا وزن له، وهو مصطنع إلى حد ما، نتخلص على الفور من فكرة جسيمات الضوء وهي فكرة أكثر بعدا عن الحقيقة، ويصبح لدينا شيء

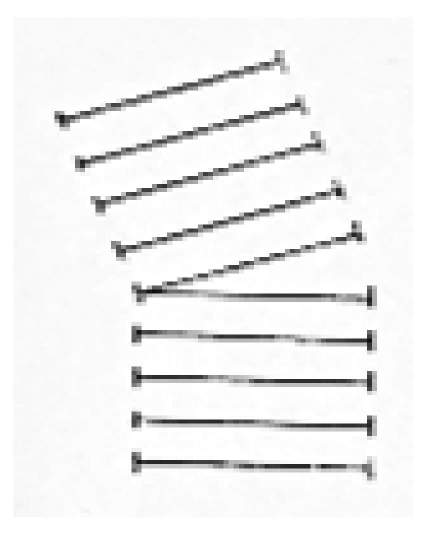
واحد بدلا من عدد لا نهائي من هذه الموجودات التي تناظر العدد الكبير من الألوان الموجودة في الطيف. ألا تظن أن هذا تقدم حقيقي؟ على الأقل تكون جميع الصعوبات قد تركزت في نقطة واحدة. بهذا الفرض نستغني عن الفرض الغريب وهو أن جسيمات ألوان الضوء المختلفة تسير بنفس السرعة في الفراغ المطلق. وحجتك الثانية صحيحة أيضا. لا يمكن إعطاء تفسير ميكانيكي للأثير. ولكن لا يوجد أدنى شك في أن الدراسة المستفيضة للظواهر الضوئية وغيرها من الظواهر الأخرى ستكشف عن تركيب الأثير. وفي الوقت الحالي يجب علينا أن ننتظر تجارب جديدة ونتائج جديدة، وأخيرا أرجو أن نوفق في التغلب على صعوبة تفسير التركيب الميكانيكي للأثير.

ن – لنترك هذا السؤال الآن لعدم إمكان الإجابة عليه إجابة محددة. أود أن أعلم كيف تتمكن بواسطة نظريتك من تفسير الظواهر التي تتضح ويمكن فهمها بواسطة نظرية الجسيمات. اعتبر مثلا ظاهرة سير أشعة الضوء في الفراغ أو في الهواء في خطوط مستقيمة. إذا وضعنا ورقة أمام شمعة فإن ظلها يكون واضحا وحادا تماما. إذا كانت النظرية الموجية للضوء صحيحة، فإنه يتعذر الحصول على ظلال محددة، وذلك لأن الموجات تنثني حول أحرف الورقة وتشوه الظل. وكما تعلم لا يعتبر قارب صغير عقبة أمام أمواج البحر، فهي تنثني حوله ببساطة دون أن تحدث ظلا.

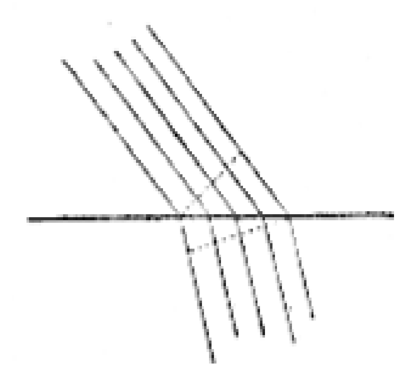
هـ – ليست هذه بحجة مقنعة. اعتبر حالة موجات قصيرة على نهر تقابل جانب سفينة كبيرة. لا تظهر الموجات الناشئة على أحد جانبي السفينة في الجانب الآخر. وإذا كانت الموجات صغيرة والسفينة كبيرة بدرجة كافية يظهر ظل واضح. ومن المحتمل جدا أن الضوء يظهر فقط كأنه يسير في خطوط مستقيمة لأن طول موجته صغير جدا بالنسبة إلى حيز الأجسام العادية والثقوب المستخدمة في التجارب. ومن الجائز أن يظهر الظل إذا أمكننا إيجاد عقبة صغيرة صغرا كافيا. وسنقابل صعوبات عملية كبيرة إذا حاولنا تصميم جهاز يبين ما إذا كان الضوء ينحني أم لا. ومع ذلك فإنه إذا أمكن تصميم مثل هذه التجربة فإنها تكون تجربة حاسمة بين النظرية الموجية ونظرية الجسيمات للضوء.

ن – قد تؤدي النظرية الموجية إلى حقائق جديدة في المستقبل، ولكني لا أعلم عن أية إحصائيات وجدت بالتجربة تتفق مع هذه النظرية بطريقة مقنعة. وما دام لم يثبت بالتجربة إمكان انحناء الضوء فإني لا أجد ما يمنع الاعتقاد بصحة نظرية الجسيمات، وهي في نظري أبسط من النظرية الموجية، وعلى ذلك فهي أفضل. سنقطع هذه المحادثة عند هذه النقطة رغم أن الموضوع لا يزال يستوجب الدراسة.

يبقى أن نبين كيف تفسر النظرية الموجية انكسار الضوء والألوان المختلفة. وكما نعلم، تمكننا نظرية الجسيمات من تفسير هذه الظواهر. سنبدأ أولا بالانكسار، وسيكون من المفيد أن نعتبره مسألة لا علاقة لها بعلم البصريات.



اعتبر رجلان يسيران في طريق ممتد ويحملان عصا مستقيمة بينهما. ونفرض أن الرجلين كانا يسيران أولا بنفس السرعة إلى الأمام. ما دامت سرعة الرجلين واحدة، صغيرة كانت أم كبيرة، فإن العصا تعاني إزاحات متوازية، أي أن اتجاهها لا يتغير. وتكون جميع أوضاع العصا موازية لوضعها الابتدائي. نفرض أن حركة الرجلين اختلفت في فترة زمنية معينة (قد تكون هذه الفترة صغيرة مثل جزء من الثانية). ماذا يحدث؟ من الواضح أن العصا تدور في أثناء هذه الفقرة. أي أن إزاحتها لا تكون موازية لوضعها الأول. وإذا سار الرجلان مرة أخرى بسرعة واحدة فإن اتجاه العصا الجديد يكون مخالفا لاتجاهها الأول. والرسم يبين ذلك بوضوح، وقد حدث التغير في الاتجاه أثناء الفترة الزمنية التي اختلفت فيها سرعة الرجلين.



سيمكننا هذا المثال من فهم معنى انكسار الموجة. لنفرض أن موجة مستوية تسير في الأثير قد قابلت لوحا من الزجاج. نرى في الرسم التالي موجة لها جبهة عريضة نسبيا، أثناء انتشارها. وجبهة الموجة

هي مستوى تكون حالة جميع أجزاء الأثير عليه واحدة عند أي لحظة معينة. وحيث أن السرعة تعتمد على الوسط الذي يمر فيه الضوء فإن سرعة الضوء في الزجاج تختلف عن سرعته في الفراغ المطلق. وفي خلال الفترة الزمنية القصيرة جدا التي تدخل فيها جبهة الموجة الزجاج، تختلف سرعة الأجزاء المختلفة من هذه الجبهة. إذ أنه من الواضح أن الجزء الذي يكون قد دخل الزجاج يسير بسرعة الضوء في الزجاج بينما يسير الجزء الباقي بسرعة الضوء في الأثير. ونتيجة لاختلاف سرعة أجزاء جبهة الموجة خلال فترة "الانغماس" في الزجاج يتغير اتجاه الموجة نفسها.

على ذلك نرى أن النظرية الموجية، مثل نظرية الجسيمات، تؤدي إلى تفسير لظاهرة الانكسار. بالتعمق في الدراسة مع الاستعانة بعلم الرياضة تتبين أن تفسير النظرية الموجية أبسط وأفضل وأن نتائجها تتفق تماما مع المشاهدة. وفي الواقع تمكننا الطرق الكمية المنطقية من استنتاج سرعة الضوء في وسط بكسره إذا كلمنا الكيفية التي ينكسر بها الشعاع عند مروره في الوسط. تبقى الآن مسألة اللون.

يجب أن نتذكر أن ما يميز موجة هما عددان، سرعتها وطول موجتها. والفرض الأساسي في النظرية الموجية للضوء هو أن أطوال الموجات المختلفة تناظر ألوانا مختلفة؛ فيختلف طول موجة الضوء الأحمر عن طول موجة الضوء البنفسجي. وهكذا بدلا من الفرض الذي

يصعب قبوله والذي يقول بأن كل لون له جسيمات معينة، لدينا الآن الاختلاف الطبيعي في أطوال الموجات.

على ذلك نستطيع وصف تجارب نيوتن في تشتت الضوء بلغتين مختلفتين: لغة نظرية الجسيمات، ولغة النظرية الموجية، فمثلا:

لغة الجسيمات

- تسير جسيمات الألوان المختلفة بسرعة واحدة في الفراغ وبسرعات مختلفة في الزجاج.

- يتركب الضوء الأبيض من جسيمات الألوان المختلفة وتتفرق هذه الجسيمات في الطيف.

لغة الموجة

الأشعة التي أطوال موجاتها مختلفة والتي تشير إلى مختلف الألوان تسير بنفس السرعة في الأثير وبسرعات مختلفة في الزجاج.

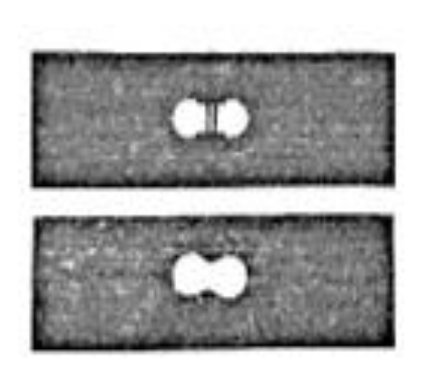
يتركب الضوء الأبيض من جميع الأمواج ذات الأطوال المختلفة وتفترق هذه الموجات في الطيف.

ويبدو أنه من المستحسن تجنب الالتباس الناشئ من وجود نظريتين مختلفتين لنفس الظواهر وذلك باختيار واحدة منهما بعد دراسة مزايا

وأخطاء كلا منهما جيدا. وتبين لنا المحادثة بين ن، هـ أن هذا العمل ليس سهلا على الإطلاق. ويكون القرار عند هذه النقطة مسألة اختيارية تختلف من شخص لآخر، ولن يكون ناتجا عن اقتناع علمي، وقد فضل أغلب العلماء في عهد نيوتن وبعده بأكثر من مائة عام نظرية الجسيمات.

وبعد ذلك بزمن طويل، في منتصف القرن التاسع عشر جاء حكم التاريخ في صالح النظرية الموجية ضد نظرية الجسيمات. لقد قال هـ في محادثته مع ن أن:

اللوحة الثانية



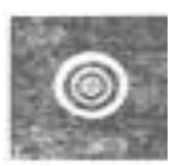
(أخذ الصورة ف. أركاديف)

في الصورة الفوتوغرافية العليا نرى بقعتين ضوئيتين نتجتا عن مرور حزمتين من الأشعة خلال ثقبي دبوس على التوالي. (أي أن أحد الثقبين فتح أولا ثم غطى بعد ذلك وفتح الآخر). في الصورة السفلى نرى شرائح رأسية نتجت عن مرور الضوء في وقت واحد خلال الفتحتين.

(أخذ الصورتين ف. أركاديف)



حيود الضوء بانثنائة حول عقبة صغيرة



حيود الضوء المار خلال ثقب صغير

الجسم بين النظريتين بالتجربة ممكن من ناحية المبدأ. فنظرية الجسيمات لا تسمح للضوء بالانحناء وتتطلب وجود ظلال حادة. أما حسب النظرية الموجية فإن عقبة صغيرة صغرا كافيا لا تسبب ظلا، وقد حقق بونج وفرينيل هذه الحقيقة عمليا كما حصلوا على نتائج نظرية.

سبق أن وصفنا تجربة بسيطة للغاية، يوضع فيها حاجز به ثقب أمام مصدر ضوئي وبذلك يظهر ظل على الحائط. سنبسط التجربة أكثر وذلك بفرض أن المصدر الضوئي يشع ضوءا متجانسا، ولكي نحصل على نتائج جيدة يجب أن يكون المصدر الضوئي قويا. لنفرض الآن أن الثقب الموجود في الستارة قد أخذ يصغر تدريجيا. إذا استعملنا مصدرا ضوئيا قويا وأفلحنا في جعل الثقب صغيرا بدرجة كافية فإننا نشاهد ظاهرة

جديدة غريبة لا يمكن تفسيرها بنظرية الجسيمات. لن نجد أي تحديد ظاهر بين الضوء والظلام. سنشاهد حول البقعة المضيئة أن الضوء يخفت تدريجيا في المنطقة المظلمة المظلمة مع ظهور سلسلة من الحلقات المضيئة والمظلمة. وظهور الحلقات هو من أخص مميزات أية نظرية موجية. ويتضح تفسير توالي المناطق المضيئة والمظلمة من تجربة أخرى تختلف بعض الشيئ عن التجربة السابقة. نفرض أن لدينا ورقة مظلمة بها ثقبا دبوس يمكن للضوء المرور منهما. إذا كان الثقبان قريبين من بعضهما وصغيرين جدا، وكان مصدر الضوء المتجانس قويا فإن كثيرا من الشرائط المضيئة والمظلمة تظهر على الحائط وتخفت تدريجيا في الظلام عند الجوانب. وتفسير ذلك بسيط، يوجد الشريط المظلم في المكان الذي يقابل فيه قاع موجة منبعثة من الثقب الأول قمة موجة منبعثة من الثقب الثاني، وذلك لأنهما يتعادلان. ويوجد الشريط المضئ في المكان الذي يتقابل فيه قمتان (أو قاعان) من الثقبين، إذ تقويان بعضهما. وتفسير الحلقات المضيئة والمظلمة في حالة وجود ثقب واحد أكثر تعقيدا منه في المثال السابق، ولكن الفكرة واحدة. ويجب أن نتذكر ظهور الشرائط المضيئة والمظلمة في حالة وجود الثقبين والحلقات المضيئة والمظلمة، في حالة وجود ثقب واحد جيدا، وذلك لأننا سنعود إلى دراسة هاتين الصورتين المختلفتين فيما بعد.

والتجربة التي وصفناها هنا تبين حيود الضوء أي الانحراف عن السير في خطوط مستقيمة عند مقابلة موجة الضوء لثقوب أو عقبات صغيرة. بالاستعانة بقليل من الرياضة، يمكن أن نذهب إلى أبعد من

ذلك بكثير فمن الممكن تحديد درجة صغر طول الموجة التي نحصل بها على نموذج معين للحلقات. وعلى ذلك تمكننا التجارب التي شرحناها هنا من قياس طول موجة الضوء المتجانس المستعمل كمصدر. ولكي نعطي القارئ فكرة عن درجة صغر هذه الأعداد سنذكر طولي موجتي الضوء الأحمر والبنفسجي وهما اللونان المحددان لطيف الشمس:

طول موجة الضوء الأحمر ۰۰. ۰ ۰۰۸ سم

" " " البنفسجي ۰۰. ۰ ۰۰٤

يجب ألا ندهش لصغر هذه الأعداد، ونحن نشاهد ظاهرة الظل المحدد (أي ظاهرة سير الضوء في خطوط مستقيمة) في الطبيعة لأن حيز العقبات والثقوب يكون في العادة كبيرا جدا بالنسبة إلى طول موجة الضوء. ولا تظهر الصفات الموجية للضوء إلا باستعمال عقبات وثقوب صغيرة جدا.

ولكن يجب ألا يعتقد القارئ أن قصة البحث عن نظرية للضوء قد انتهت. لم يكن حكم القرن التاسع عشر نهائيا، فلا تزال مشكلة الحسم بين الجسيمات والموجات موجودة بأكملها أمام عالم الطبيعة الحديث، والمشكلة الآن أكثر عمقا وتداخلا. فلنقبل هزيمة نظرية الجسيمات للضوء إلى أن نرى المشاكل التي تنتج عن انتصار النظرية الموجية.

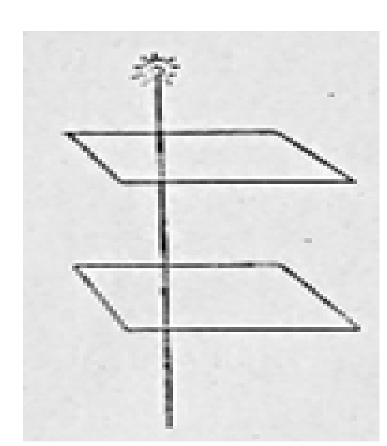
هل موجات الضوء طولية أم مستعرضة؟

ولكن تبقى مشكلة أخرى لم تحل بعد، ألا وهي تحديد الخواص الميكانيكية للأثير. ولحل هذه المشكلة يجب أن نعلم هل موجات الضوء في الأثير طولية أم مستعرضة. ويمكن أيضا وضع هذا السؤال كما يأتي: هل انتقال الضوء يماثل انتقال الصوت؟ هل تحدث الموجة نتيجة لتغيرات في كثافة الوسط وبذلك تكون ذبذبات الجسيمات في اتجاه سير الضوء؟ أم هل يشبه الأثير مادة غروية مرنة وبذلك لا تنشأ فيه إلا موجات مستعرضة وتسير جسيماته في اتجاه عمودي على اتجاه سير الموجة؟

قبل دراسة هذه المسألة، سنحاول أن نفكر في الحل المناسب الذي سنختاره. من الواضح أننا نكون أسعد حظا لو كانت موجات الضوء طولية، وذلك لأن صعوبات تكوين أثير ميكانيكي تكون أبسط في هذه الحالة. ومن الجائز جدا أن تكون الصورة التي ترسمها للأثير شبيهة بالصورة الميكانيكية للغازات وهي الصورة التي تفسر انتقال موجات الصوت. وتخيل وجود موجات مستعرضة في الأثير أصعب من ذلك بكثير. وليس من السهل تكوين صورة لمادة غروية مكونة من جسيمات بحيث تنشأ عنها موجات مستعرضة. وكان هيجنز يميل إلى الاعتقاد بأن الأثير يشبه "الهواء" أكثر من "الغراء"، ولكن الطبيعة لا تهتم كثيرا بما نطلبه ونحدده. هل أشفقت الطبيعة في هذه الحالة بعلماء الطبيعة الذين

يحاولون فهم جميع الأحداث من وجهة نظر ميكانيكية؟.. للإجابة على هذا السؤال تلزم دراسة تجارب جديدة.

سندرس بالتفصيل تجربة واحدة فقط من بين التجارب الكثيرة التي تستطيع أن تجيبنا على هذا السؤال. نفرض أن لدينا لوحا رفيع جدا من التورمالين المتبلور ومقطوع بشكل معين لا داعي لوصفه هنا. يجب أن يكون اللوح المتبلور رفيعا لتتمكن من رؤية الضوء خلاله. خذ الآن لوحين من هذا النوع وضعهما بين العينين وبين الضوء. ماذا تنتظر أن ترى؟ مرة أخرى نقطة ضوئية إذا كان اللوح رفيعا بدرجة كافية. في أغلب الأحيان تحقق التجربة ما ننتظره، أي أننا نرى النقطة الضوئية خلال البلورتين.



نغير بعد ذلك إذا عين محور الدوران. سنأخذ الشعاع الساقط محورا للدوران. ويكون معنى الدوران أننا نغير موضع نقط البلورة ماعدا النقط الواقعة على المحور. يحدث شئ غريب! يخفت الضوء تدريجيا إلى أن يتلاشى في النهاية، ثم يظهر ثانية إذا استمر الدوران ونستعيد المنظر الأول عندما نصل إلى الوضع الابتدائي. يمكننا أن نسأل السؤال الآتي دون أن ندخل في تفاصيل هذه التجربة وما يشابهها من التجارب: هل يمكن تفسير هذه الظواهر إذا كانت موجات الضوء طولية؟.. في حالة الموجات الطولية تتحرك جسيمات الأثير في اتجاه المحور، مثلها في ذلك مثل الشعاع. إذا أديرت البلورة

حول المحور لا يتغير أي شئ على هذا المحور. النقاط الموجودة على المحور لا تتحرك ولا يعاني الجوار المباشر للمحور إلا إزاحة صغيرة جدا. وإذن في حالة الموجة الطولية، لا يمكن أن يحدث تغيير واضح مثل اختفاء وظهور الصورة. ويمكن تفسير هذه الظاهرة ومثيلاتها من الظواهر الأخرى إذا فرضنا أن موجات الضوء مستعرضة وليست طولية! أي إذا فرضنا أن للأثير صفة المواد الغروية.

وهذا أمر يؤسف له، ويجب أن نستعد لمواجهة صعوبات كبيرة في محاولتنا وصف الأثير ميكانيكيا.

الأثير ووجهة النظر الميكانيكية:

إن دراسة جميع محاولات فهم الخواص الميكانيكية للأثير كوسط يمر الضوء فيه تحتاج إلى وقت طويل. ومعنى التركيب الميكانيكي كما نعلم هو أن الشيئ المادي يتكون من جسيمات تؤثر كشيء مادي شبيه الغراء، كان على علماء الطبيعة أن يفرضوا فروضا جد مفتعلة وغير طبيعية. ولن نذكر هذه الفروض هنا فهي تنتسب إلى الماضي البعيد. ولكن النتيجة كانت مهمة وذات مغزى. لقد كانت الصفات الغريبة لجميع هذه الفروض وضرورة الأخذ بكثير منها كل مستقل عن الآخر، كافيا لزعزعة الاعتقاد في وجهة النظر الميكانيكية.

ولكن هناك اعتراضات أخرى ضد الأثير أبسط من صعوبة تكوينه. يتحتم أن يوجد الأثير في كل مكان إذا كنا نريد تفسير الظواهر البصرية

ميكانيكيا. وإذا كان الضوء لا يسير إلا في وسط فإنه لا يوجد في أي فراغ خالي. ولكننا نعلم من الميكانيكا أن الفراغ الموجود بين المجموعة الشمسية لا يقاوم حركة الأجسام المادية؛ فمثلا تتحرك الكواكب خلال الأثير الغروي دون أن تصادف مقاومة على خلاف ما يحدث عندما تتحرك في أي وسط مادي آخر. وإذا كان الأثير لا يقاوم حركة المادة فإننا نستنتج أنه لا يوجد تفاعل بين جسيمات الأثير وجسيمات المادة. يمر الضوء خلال الأثير كما يمر خلال الزجاج والماء، ولكن سرعته تتغير في المادتين الأخيرتين، فكيف يمكن تفسير هذه الحقيقة ميكانيكيا؟ من الواضح أنه لا يمكن تفسيرها إلا بفرض وجود تفاعل ما بين جسيمات الأثير وجسيمات المادة. ولكننا رأينا منذ برهة، أنه في حالة حركة الحرة يجب أن نفترض عدم وجود مثل هذا التفاعل. أي أنه يوجد تفاعل بين الأثير والمادة في الظواهر الضوئية ولا يوجد أي تفاعل بينهما في الظواهر الميكانيكية! ومن المؤكد أن هذه نتيجة تناقض نفسها.

يبدو أن هناك طريقا واحدا للخلاص من هذه الصعوبات. في جميع مراحل تطور العلم حتى القرن العشرين، نجد أنه لمحاولة فهم ظواهر الطبيعة على أساس ميكانيكي لا بد من إدخال كثير من المواد المصطنعة وغير الواقعية مثل الموائع الكهربائية والمغناطيسية وجسيمات الضوء والأثير. ونتيجة لهذا تتركز جميع الصعوبات في عدد قليل من النقط الأساسية، مثل الأثير في حالة الظواهر الضوئية، إذ يبدو هنا أن جميع المحاولات غير المثمرة لتفسير الأثير تفسيرا بسيطا وكذلك الاعتراضات الأخرى تشير إلى أن الخطأ ناشئ عن الفرض الأساسي بإمكان تفسير

جميع أحداث الطبيعة من وجهة النظر الميكانيكية. ولم ينجح العلم في إتمام البرنامج الميكانيكي بطريقة مرضية، ولا يوجد الآن عالم من علماء الطبيعة يعتقد بإمكان إتمامه.

في استعراضنا للأفكار الطبيعية الأساسية قابلتنا بعض المشاكل التي لم تحل، وصعوبات وعقبات ثبطت همتنا في محاولة تكوين صورة منتظمة متماسكة لظواهر العالم الخارجي. فمثلا في الميكانيكا الكلاسيكية، كان هناك الدليل الذي لا يلاحظ وهو تساوي كتلتي القصور الذاتي والجاذبية، كما كانت هناك الصفة المصطنعة للموائع الكهربائية والمغناطيسية، والقوة التي تؤثر بين التيار الكهربائي والإبرة المغناطيسية وهي صعوبات لم تحل، ويذكر القارئ أن هذه القوة لم تؤثر في الخط الواصل بين السلم والقطب المغناطيسي، وأنها كانت تتوقف على سرعة الشحنة المتحركة. وكان القانون الذي يعبر عن قيمتها واتجاهها معقدا للغاية. وأخيرا كانت هناك عقبة الأثير الكبرى.

لقد هاجم علم الطبيعة الحديث جميع هذه المشاكل وحلها، ولكن أثناء صراعه لحلها، نشأت مشاكل جديدة وعويصة. فكما أن معلوماتنا الآن أوسع وأشمل من معلومات علماء الطبيعة في القرن التاسع عشر، فإن صعوباتنا وشكوكنا أكثر.

تلخيص:

نلاحظ في نظرية الموائع الكهربائية القديمة، وفي نظرية الجسيمات، والنظرية الموجية.. محاولات أخرى لتطبيق وجهة النظر الميكانيكية، ولكننا نقابل صعوبات شديدة في تطبيق وجهة النظر الميكانيكية للظواهر الكهربائية والبصرية.

إذا أثرت شحنة متحركة على سرعة الشحنة، والقوة ليست جاذبة ولا طاردة وإنما تؤثر في اتجاه عمودي على الخط الواصل بين الشحنة والإبرة.

في علم البصريات يجب علينا أن نقرر تفضيل النظرية الموجية على نظرية الجسيمات للضوء. من المؤكد أن فكرة انتشار الموجات في وسط يتكون من جسيمات تؤثر بينها قوى هي فكرة ميكانيكية، ولكن ما هو الوسط الذي ينتشر فيه الضوء وما هي خواصه الميكانيكية؟ ليس هناك أي أمل في اختصار الظواهر الضوئية إلى ظواهر ميكانيكية دون الإجابة على هذا السؤال، ولكن صعوبات الإجابة على هذا السؤال عظيمة جدا؛ ولذلك سنضطر إلى تركه وترك وجهة النظر الميكانيكية أيضا.

الباب الثالث

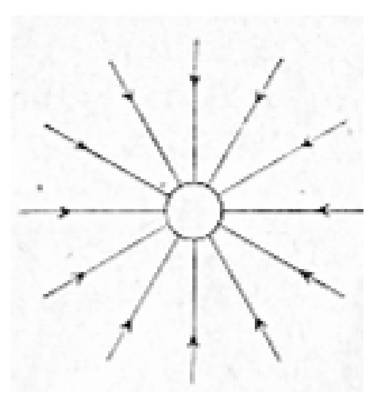
المجال ـ النسبية

المجال كوسيلة لتمثيل الواقع:

لقد أدخلت أفكار جديدة وثورية في علم الطبيعة خلال النصف الثاني من القرن التاسع عشر، وقد مهدت هذه الأفكار الطريق إلى اتجاه فلسفي جديد يختلف عن وجهة النظر الميكانيكية. ولقد ولدت مبادئ جديدة نتيجة لأبحاث فاراداي ومكسويل وهرتز وكونت هذه المبادئ صورة جديدة للحقيقة.

ومهمتنا الآن هي وصف الأثر الذي أحدثته هذه المبادئ الجديدة في العلم، وأن نبين كيف قويت واتضحت هذه المبادئ. وسنحاول شرح تطور هذه الأفكار بطريقة منطقية دون أن نهتم كثيرا بالترتيب التاريخي.

لقد نشأت المبادئ الجديدة عن الظواهر الكهربائية ولكن من الأبسط أن ندخلها عن طريق الميكانيكا. إذا كان لدينا جسيمان فإننا نعلم أنهما يجذبان بعضهما وأن قوة الجذب هذه تتناسب عكسيا مع مربع البعد. يمكننا تمثيل هذه الحقيقة بطريقة جديدة، وسنفعل ذلك رغم صعوبة فهم مميزات ذلك. تمثل الدائرة الصغيرة في الرسم جسما جاذبا، الشمس مثلا. والواقع أن هذه المجموعة هي مجموعة فراغية وليست رسما في مستو. فالدائرة الصغيرة تمثل كرة في الفراغ الشمسي مثلا.



إذا وجد جسم (يسمى جسم اختبار) في جوار الشمس فإنه ينجذب لها بقوة خط عملها هو الخط الواصل بين مركزي الجسمين. وعلى ذلك تمثل الخطوط الموجودة في الرسم اتجاه قوة جذب الشمس لأوضاع جسم الاختبار المختلفة. ويبين السهم الموجود على كل خط أن القوة متجهة نحو الشمس. تسمى هذه المستقيمات خطوط قوة مجال الجاذبية، وسنعتبر هذا في الوقت الحاضر اسما، ولا داعي لبحث هذه التسمية الآن. وتوجد خاصية مميزة للرسم السابق سنوضح أهميتها فيما بعد، وهي أن جميع خطوط القوة موجودة في الفراغ حيث لا توجد مادة. ومؤقتا تبين جميع خطوط القوة أو المجال كيف يسلك جسم الاختبار إذا اقترب فقط من الكرة (صاحبة المجال).

في هذا التمثيل الفراغي، جميع الخطوط عمودية على سطح الكرة. وحيث أنها جميعا تتفرق من نقطة واحدة، فإنها تكون كثيفة بالقرب من الكرة ويقل تكاثفها كلما زاد البعد عن الكرة. وإذا ازداد البعد عن الكرة إلى ضعفه أو ثلاثة أمثاله فإن تكاثف الخطوط في التمثيل الفراغي (رغم عدم صحة ذلك في الشكل المستوي) يقل إلى الربع أو التسع على التوالي. أي أن هذه الخطوط تؤدي غرضين؛ فهي تبين اتجاه القوة المؤثرة على الجسم الموجود في جوار الكرة التي تمثل الشمس، كما أن تكاثف هذه الخطوط في الفراغ يبين العلاقة بين القوى والبعد.

وإذا فسر المجال تفسيرا صحيحا فإنه يمثل اتجاه قوة الجاذبية وعلاقتها بالبعد. ويمكن للإنسان أن يقرأ قانون الجاذبية من مثل هذا

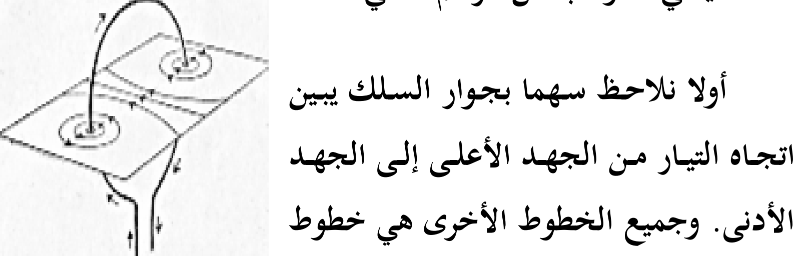
الرسم كما يقرأه من الوصف بالكلام أو بلغة الرياضة المضبوطة الاقتصادية. قد يكون التمثيل بالمجال واضحا وذا أهمية، ولكن لا يوجد أي سبب يجعلنا نعتقد أنه يدل على أي تقدم حقيقي. ومن الصعب جدا إثبات فائدة هذا التمثيل في حالة الجاذبية. وقد يجد البعض أنه من المفيد عدم اعتبار هذه الخطوط على أنها رسوم فقط وأن يتخيلوا التأثير الحقيقي للقوى التي تعمل فيها. ويمكن القيام بذلك ولكن يتحتم الفرض بأن التأثير في هذه الخطوط له سرعة لا نهائية؛ فحسب قانون نيوتن لا تتوقف القوة إلا على البعد فقط ولا علاقة لها بالزمن. أي أن القوة يجب ألا تحتاج إلى وقت لتصل من جسم لآخر. ولكن حيث أن الحركة بسرعة لا نهائية لا تعني أي شئ بالنسبة إلى شخص مدرك فإن محاولة اعتبار الرسم السابق شيئا أكثر من نموذج لا تؤدي إلى شئ بالمرة.

ونحن لا نريد بحث مسألة الجاذبية الآن. وهي فقط مقدمة تبسط شرح الطرق المماثلة في نظرية الكهرباء.

سنبدأ بدراسة التجربة التي ولدت صعوبات جدية في تفسيرنا الميكانيكي. كان لدينا تيار ينساب في سلك دائري حول إبرة مغناطيسية في مركز السلك، وفي اللحظة التي بدأ التيار فيها في الانسياب، ظهرت قوة جديدة تؤثر على القطب المغناطيسي وعموديه على جميع الخطوط الواصلة بين السلك والقطب.. وفي الحالة التي نشأت فيها هذه القوة عن الحركة الدائرية لشحنة كهربائية، بينت تجربة رولاند أن القوة تتوقف على سرعة الشحنة. هذه الحقائق التي حصل عليها بالتجربة تناقض

وجهة النظر الفلسفية التي تقول أن القوة لا بد وأن تؤثر في الخط الواصل بين الجسمين وأنها تتوقف على البعد بينهما فقط.

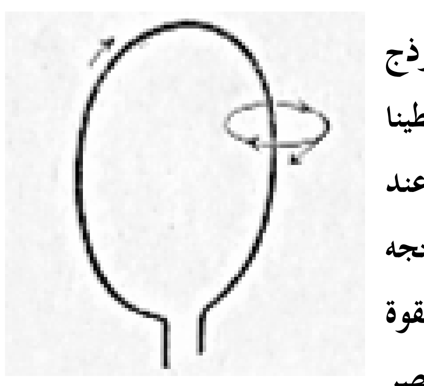
إن التعبير المضبوط الذي يمثل القوة التي يؤثر بها التيار على قطب مغناطيسي معقد للغاية، والتعبير المناظر في حالة الجاذبية أبسط منه بكثير، ومع ذلك فيمكننا محاولة النظر إلى الموضوع كما فعلنا في حالة قوة الجاذبية تماما. والسؤال الذي أمامنا الآن هو: ما هي القوة التي يؤثر بها التيار على قطب مغناطيسي قريب منه؟.. من الصعب وصف هذه القوة بالكلام. وحتى الصيغة الرياضية تكون معقدة للغاية. وأفضل شئ هو تمثيل ما نعلمه عن القوى المؤثرة بالرسم أو بنموذج كلامي يحتوي على خطوط القوى. وتوجد صعوبة سببها أن القطب المغناطيسي لا يوجد إلا مع قطب مغناطيسي آخر في مزدوج مغناطيسي. ومع ذلك فيمكننا دائما أن نتصور أن الإبرة المغناطيسية طويلة بدرجة تجعلنا لا نأخذ في حسابنا إلا القوى المؤثرة على القطب القريب من التيار. ويكون القطب الثاني بعيدا بدرجة تمكننا من إهمال القوة المؤثرة عليه. ولتحاشي الالتباس سنفرض أن القطب المغناطيسي القريب من السلك هو القطب الموجب. يمكننا قراءة خواص القوة المؤثرة على القطب المغناطيسي الموجب من الرسم التالي:



أولا نلاحظ سهما بجوار السلك يبين اتجاه التيار من الجهد الأعلى إلى الجهد الأدنى. وجميع الخطوط الأخرى هي خطوط

قوة تخص هذا التيار واقعة في مستو معين. وإذا رسمنا هذه الخطوط جيدا، فإنها تدل على اتجاه متجه القوة الذي يمثل تأثير التيار على قطب موجب معلوم، كما تعطينا فكرة عن طول هذا المتجه. القوة هي متجه كما نعلم، ولتعيين هذا المتجه يجب أن نعلم كلا من اتجاهه وطوله. والذي يهمنا أكثر من غيره هو اتجاه القوة المؤثرة على قطب. والسؤال الذي أمامنا هو كيف نعلم من الرسم اتجاه القوة المؤثرة على قطب، عند أي نقطة في الفراغ.

والقاعدة التي نعين بها اتجاه القوة من مثل هذا النموذج ليست ببساطة مناظرتها في المثال السابق الذي كانت خطوط القوة فيه مستقيمة. الرسم التالي يبين خط قوة واحد وذلك لإيضاح القاعدة. يقع متجه القوة على المماس لخط القوة كما هو موضح. وسهم متجه القوة والأسهم الموجودة على خط القوة تشير جميعا إلى نفس الاتجاه. أي أن هذا هو الاتجاه الذي تؤثر فيه القوة على القطب المغناطيسي عند هذه النقطة.

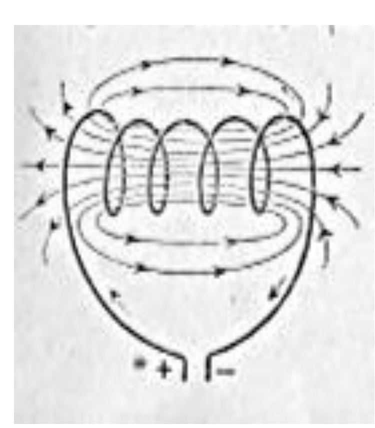


والرسم الجيد، أو الأنموذج المضبوط (وهذا تعبير أدق) يعطينا أيضا فكرة عن طول متجه القوة عند أي لحظة يجب أن يكون هذا المتجه أطول عندما تكون خطوط القوة أكثف، أي بالقرب من السلك، وأقصر

عندما تكون الخطوط أقل تكاثفا أي بعيدا عن السلك.

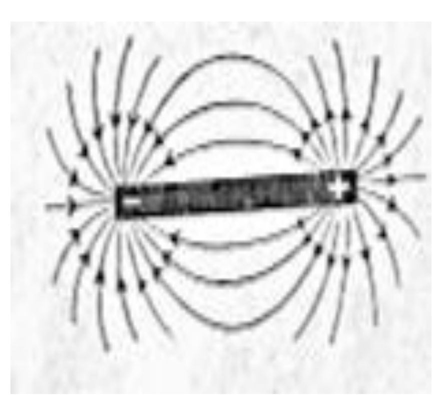
بهذه الطريقة، تمكننا خطوط القوة أو المجال بعبارة أخرى، من تعيين القوى المؤثرة على قطب مغناطيسي عند أي نقطة في الفراغ. وفي الوقت الحالي يكون هذا هو المبرر الوحيد لهذا التصميم المتعب للمجال. وحيث أننا نعلم ماذا يمثل المجال، فإننا سندرس خطوط القوة المناظرة للتيار دراسة أعمق. هذه الخطوط هي دوائر تحيط بالسلك وتقع في المستوى العمودي على مستواه. وبقراءة خواص القوة من الرسم نرى مرة ثانية أن القوة تؤثر في اتجاه عمودي على أي مستقيم واصل بين السلك والقطب. وذلك لأن المماس لدائرة يكون دائما عمودي على نصف القطر. يمكن تلخيص كل ما نعلمه عن القوة المؤثرة في نموذج المجال، ونحن نضيف فكرة المجال إلى فكرة التيار والقطب المغناطيسي ونستعين بها جميعا لتمثيل القوة المؤثرة بطريقة بسيطة.

يوجد مجال مغناطيسي يناظر كل تيار، أي تؤثر قوة على قطب مغناطيسي عند اقترابه من سلك ينساب فيه تيار. ونشير هنا إلى أن هذه الخاصية تمكننا من تصميم أجهزة حساسة تدل على وجود التيار أو عدم وجوده. بمجرد أن نعرف كيف نقرا خواص القوى المغناطيسية من نموذج المجال لتيار ما، سنرسم



دائما المجال المحيط بالسلك الذي ينساب فيه التيار وذلك لتمثيل تأثير القوى المغناطيسية عند أي نقطة في الفراغ. ومثالنا الأول هو ما يسمى "الملف الحلزوني"، وهو ملف من السلك كما هو مبين في الشكل، وغرضنا هو أن نعلم بالتجربة كل ما يمكننا عن المجال المغناطيسي الخاص بتيار ينساب في ملف حلزوني وأن نجمع هذه المعلومات لعمل المجال. والرسم التالي يمثل النتيجة. خطوط القوى المنحنية مقفلة وتحيط بالملف الحلزوني بالطريقة التي تميز المجال المغناطيسي للتيارات..

ويمكن عمل مجال قضيب مغناطيسي بنفس طريقة عمل مجال كهربائي. والشكل التالي يبين ذلك. تتجه خطوط القوى من القطب الموجب إلى السالب دائما. ويقع متجه القوة على المماس لخط القوة دائما ويكون أطوال ما يمكن بالقرب من القطبين وذلك لأن تكاثف خطوط القوة يكون أكبر ما يمكن عند هاتين النقطتين. يمثل متجه القوة تأثير المغناطيس على قطب مغناطيسي موجب. في هذه الحالة ينشأ المجال عن المغناطيس لا عن التيار.



يجب أن نقارن الشكلين الأخيرين بدقة. في الشكل الأول يوجد المجال المغناطيسي لتيار ينساب في ملف حلزوني، وفي الثاني مجال

قضيب مغناطيسي. فلنهمل كلا من الملف الحلزوني والقضيب ونلاحظ المجالين الخارجين فقط. نلاحظ على الفور أن كلا من المجالين له نفس الخواص تماما. في كل من الحالتين تتجه خطوط القوة من أحد طرفي الملف أو القضيب إلى الطرف الآخر. هذه هي أولى ثمار تمثيل المجال! فإنه ليصعب جدا ملاحظة تشابه قوى بين تيار ينساب في ملف حلزوني وبين قضيب مغناطيسي إذا لم نقم بعمل المجال.

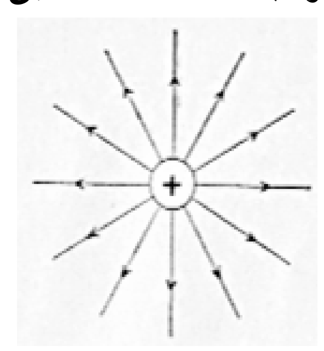
يمكننا الآن اختبار فكرة المجال اختبارا أقسى من ذلك بكثير. سنرى في القريب العاجل ما إذا كانت هذه الفكرة تمثيلا جديدا للقوى المؤثرة أم أنها تعني شيئا آخر فضلا عن ذلك. يمكننا أن نستعمل المنطق الآتي: افرض مؤقتا أن المجال يميز جميع الأحداث التي تحددها مصادره بطريقة وحيدة، وليس هذا إلا تخمينا، وهو يعني أنه إذا كان لكل من الملف الحلزوني والقضيب نفس المجال، فإن جميع تأثيراتهما تكون واحدة أيضا. ويكون معنى ذلك أن خواص ملفين حلزونين يحملان تيارين كهربائيين هي نفس خواص قضيبين مغناطيسيين وأنهما يتجاذبان أو يتنافران على حسب وضعهما النسبي كما في حالة القضيبين. وهذا يعني أيضا أن قضيبا مغناطيسيا وملفا حلزونيا يتجاذبان أو يتنافران بنفس الطريقة التي ينجذب أو يتنافر بها قضيبان مغناطيسيان. وبالاختصار يكون معنى ما سبق أن جميع تأثيرات ملف حلزوني يمر فيه تيار هي نفس تأثيرات مغناطيس مناظر، وذلك لأن المجال وحده هو المسئول عن هذه التأثيرات، والمجال في كل من الحالتين له نفس الخواص. والتجربة تحقق تخميناتنا تماما!

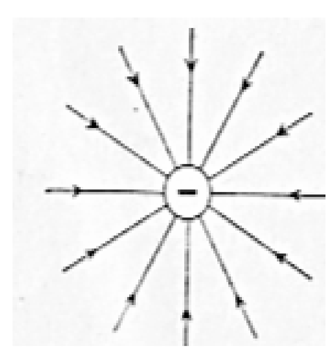
يستطيع القارئ أن يتخيل صعوبة الحصول على هذه الحقائق بدون فكرة المجال! إن تعبير القوة المؤثرة بين سلك ينساب فيه تيار وبين قطب مغناطيسي معقد للغاية – وفي حالة ملفين حلزونيين – يجب علينا دراسة القوى التي يؤثر بها تياران كل على الآخر. ولكن إذا قمنا بذلك مع الاستعانة بالمجال فإننا نلاحظ فورا خواص هذه التأثيرات بمجرد أن نتحقق من تشابه مجال الملف الحلزوني ومجال القضيب المغناطيسي. من حقنا الآن أن نعتبر المجال شيئا آخر يزيد عن فكرتنا الأولى عنه. ويبدو لنا أن خواص المجال وحده هي التي تهم في وصف الظواهر، أما اختلاف مصدر المجال فلا يهم. وتظهر أهمية فكرة المجال عندما تؤدي إلى حقائق عملية جديدة.

لقد أثبتت فكرة المجال فائدتها الكبيرة. وقد بدأت هذه الفكرة كشيء يوجد بين المصدر والإبرة المغناطيسية لوصف القوة المؤثرة، وكان ينظر للمجال على أنه وكيل للتيار تحدث جميع تأثيرات التيار عن طريقه، ولكن يقوم الآن هذا الوكيل بدور المترجم الذي يترجم القوانين إلى لغة بسيطة واضحة يسهل فهمها. إن وكيل التيار تحدث جميع تأثيرات التيار عن طريقه، ولكن يقوم الآن هذا الوكيل بدور المترجم الذي يترجم القوانين إلى لغة بسيطة واضحة يسهل فهمها. إن النجاح الأول للتمثيل بالمجال يجعلنا نظن أن من المناسب دراسة جميع تأثيرات التيارات والمغناطيسات والشحنات بطريقة غير مباشرة؛ أي بمساعدة المجال كمفسر. ويمكن اعتبار المجال كشيء يصاحب التيار دائما،

فالمجال يوجد رغم عدم وجود قطب مغناطيسي نختبر به وجوده (أي المجال) فلنحاول تتبع هذا الدليل الجديد باستمرار.

ويمكن دراسة مجال موصل مشحون بنفس الطريقة التي درسنا بها مجال الجاذبية أو مجال التيار أو المغناطيس، ومرة أخرى نجد أبسط الأمثلة!.. لعمل مجال كرة مشحونة يجب أن نعلم أي نوع من القوى يؤثر على جسم اختبار صغير موجب الشحنة عند اقترابه من مصدر المجال أي من الكرة المشحونة. واختيار جسم اختبار موجب الشحمة لا سالبها هو مسألة اتفاق فقط لتحديد اتجاه الأسهم الموجودة على خطوط القوة. والنموذج في هذه الحالة يشابه مجال الجاذبية (ص ٩٠) وذلك لتشابه قانوني كولوم ونيوتن، والفرق الوحيد بين هذبن النموذجين هو أن الأسهم تشير في اتجاهين متضادين. وفي الواقع نعلم أن شحنتين موجبتين تتنافران كتلتين تتجاذبان. ومع ذلك فإن مجال كرة سالبة الشحنة يكون مطابقا لمجال الجاذبية وذلك لأن جسم الاختبار الصغير الموجب الشحنة سيجذب إلى مصدر المجال.





إذا كان لدينا قطبان ساكنان أحدهما كهربائي والآخر مغناطيسي فإنه لا توجد قوة جذب أو طرد بينهما، ويمكن التعبير عن هذه الحقيقة بلغة المجال كما يأتي: المجال الكهربائي الإستاتيكي لا يؤثر على المجال المغناطيسي وبالعكس. والمجال الكهربائي الإستاتيكي هو المجال الكهربائي الذي لا يتغير بمرور الزمن. تبقى المغناطيسات والشحنات ساكنة بجانب بعضها أية فترة زمنية إذا لم تؤثر عليها قوة خارجية. كل من المجال الكهربائي والمغناطيسي ومجال الجاذبية يختلف تماما عن الآخرين، ولا تمتزج هذه المجالات ويحتفظ كل منها بذاته ولا يتأثر بالآخرين.

ولنعد الآن إلى الكرة الكهربائية التي بقيت حتى الآن ساكنة. نفرض أن هذه الكرة بدأت تتحرك نتيجة لتأثير قوة خارجية، تتحرك الكرة المشحونة. بلغة المجال تقرأ الجملة السابقة كما يأتي: يتغير مجال الكرة المشحونة بتغير الزمن. ولكننا نعلم من تجربة رولاند أن حركة هذه الكرة المشحونة تكافئ تيارا كهربائيا. وأيضا نعلم أن مجالا مغناطيسيا بصاحب كل تيار. وعلى ذلك تكون لدينا السلسلة الآتية:

حركة شحنة –––– > تغير في مجال كهربائي.

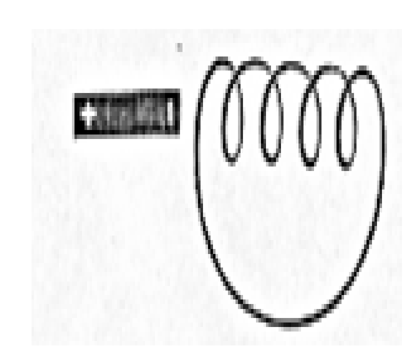
تيار––– > المجال المغناطيسي المصاحب.

وعلى ذلك نستنتج أن: التغير في المجال الكهربائي الناتج عن حركة الشحنة يصطحب دائما بمجال مغناطيسي. تعتمد هذه النتيجة

على تجربة أورستد، ولكنها تشمل أكثر من ذلك؛ فهذه النتيجة تحوي الاعتراف بأن مصاحبة مجال مغناطيسي لمجال كهربائي يتغير مع الزمن حقيقة أساسية لدراستنا القادمة.

إذا ما ظلت شحنة ما ساكنة فإنه لا يوجد سوى مجال إلكتروستاتيكي، ولكن يظهر مجال مغناطيسي بمجرد أن تبدأ الشحنة في الحركة، يكون المجال أن تبدأ الشحنة في الحركة. ويمكننا أن نذهب إلى أبعد من ذلك يكون المجال المغناطيسي الذي تولده حركة الشحنة أشد إذا كانت الشحنة أكبر وإذا تحركت أسرع. هذه الحقيقة هي أيضا نتيجة لتجربة رولاند. مرة أخرى باستعمال لغة المجال يمكننا أن نقول: كلما كان تغير المجال الكهربائي أسرع كلما كان المجال المغناطيسي المصاحب أشد. لقد حاولنا هنا ترجمة بعض الحقائق المعروفة من لغة الموائع التي نشأت من وجهة النظر الميكانيكية القديمة إلى لغة المجالات الجديدة. وسنرى فيما بعد وضوح وبعد مدى لغتنا الجديدة.

دعامتا نظرية المجال:



"يصاحب تغير المجال الكهربائي مجال مغناطيسي". إذا بادلنا كلمتي كهربائي ومغناطيسي كلا محل الأخرى فإن الجملة السابقة تصبح : "يصاحب تغير المجال

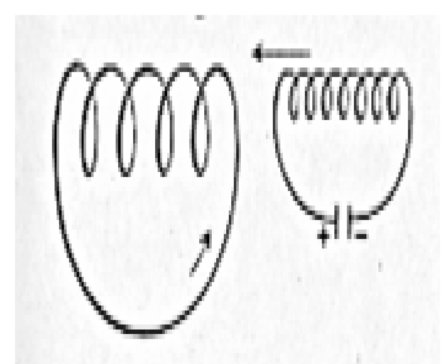
المغناطيسي مجال كهربائي". لا يمكن الجزم بصحة أو خطأ هذه العبارة إلا عمليا بالتجربة، ولكن لغة المجال هي التي تعطينا فكرة صياغة هذه المسألة.

منذ أكثر من مائة عام بقليل أجرى فاراداي تجربة نتج عنها الاكتشاف العظيم للتيارات المنتجة بالتأثير. والتجربة بسيطة للغاية. نحتاج فقط إلى ملف حلزوني أو أية دائرة كهربائية أخرى، وقضيب مغناطيسي وأحد الأجهزة التي تدلنا على وجود التيار. عند الابتداء يكون القضيب المغناطيسي ساكنا بالقرب من الملف الحلزوني الذي يكون دائرة مقفلة. لا يمر أي تيار في السلك وذلك لعدم وجود مصدر له. يوجد مجال للمغناطيس الساكن وهو مجال لا يتغير بمرور الزمن. وفجأة يتغير وضع المغناطيس إما بإبعاده كلية أو بتقريبه من الملف الحلزوني، وذلك حسب رغبتنا. في هذه اللحظة يظهر تيار لفترة زمنية قصيرة جدا، ثم يتلاشى بعد ذلك. ويظهر التيار كلما تغير موضع المغناطيس، ويمكن التحقق من وجود التيار بواسطة جهاز حساس. ولكن التيار حسب نظرية المجال يعني وجود مجال كهربائي يعمل على انسياب المائعين الكهربائيين خلال السلك. وعلى ذلك يتلاشى كل من التيار والمجال الكهربائي عندما يسكن المغناطيس ثانية.

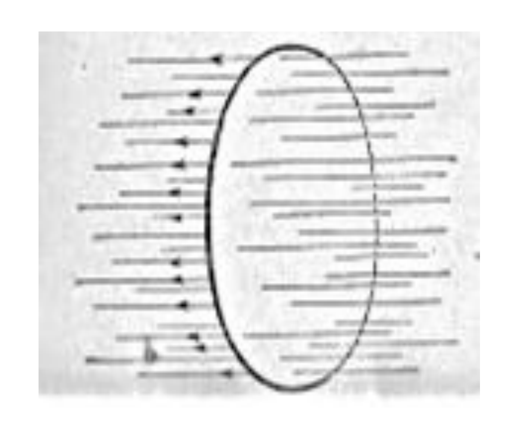
تخيل مؤقتا أن لغة المجال معروفة وأنه يجب وصف نتائج هذه التجربة كميا ونوعيا بلغة الميكانيكا القديمة. على ذلك تبين هذه التجربة أنه نتيجة لحركة المزدوج المغناطيسي ولدت قوة جديدة تحرك المائع

الكهربائي في السلك. ويكون السؤال الثاني كما يأتي: ما الذي تتوقف عليه هذه القوة؟.. وتكون الإجابة على هذا السؤال في غاية الصعوبة؛ فيكون من المحتم علينا أن ندرس علاقة القوة بسرعة المغناطيس وشكله وبشكل الدائرة. وزيادة على ذلك، فإننا إذا عبرنا عن هذه التجربة باللغة القديمة فإنها لا تعطينا أية إشارة على الإطلاق للدلالة على ما إذا كان من الممكن إنتاج تيار بالتأثير بتحريك دائرة كهربائية أخرى تحمل تيارا بدلا من تحريك قضيب مغناطيسي.

تختلف الحالة تماما إذا استعملنا لغة المجال وفرضنا مرة أخرى أن المجال هو الذي يحدد جميع التأثيرات. نرى على الفور أن الملف الحلزوني الذي يمر فيه تيار يقوم مقام قضيب المغناطيس تماما. يبين الشكل ملفين أسطوانيين الأول صغير يمر فيه تيار، والثاني وهو الأكبر تختبر به وجود التيار المنتج بالتأثير. يمكننا أن نحرك



الملف الحلزوني كما حركنا قضيب المغناطيس من قبل. كما يمكننا بدلا من تحريك الملف الصغير أن نولد مجالا مغناطيسيا ونلاقيه بتوليد التيار وملاشاته، أي بفتح وقفل الدائرة. مرة أخرى تثبت عمليا صحة حقائق جديدة نتجت عن نظرية المجال.



فلنعتبر مثالا أبسط من ذلك. لدينا سلك مقفل ولا يوجد أي مصدر للتيار. بالقرب من هذا السلك يوجد مجال مغناطيسي. وليس من المهم معرفة مصدر هذا المجال الذي قد يكون دائرة أخرى يمر فيها تيار أو قضيب مغناطيسي. يبين الشكل الدائرة المقفلة وخطوط القوة المغناطيسية. إن الوصف الكمي والنوعي لظاهرة إنتاج التيارات بالتأثير بسيط جدا إذا استخدمنا لغة المجال. وكما هو مبين في الشكل تمر بعض خطوط القوة خلال السطح المحدود بالسلك.

ويجب علينا دراسة خطوط القوى التي تقطع ذلك الجزء من المستوى الذي يحيط به السلك. لا يوجد أي تيار كهربائي مادام المجال لا يتغير مهما كانت شدته. ولكن يبدأ تيار في المرور في السلك بمجرد أن يتغير عدد خطوط القوة التي تخترق السطح المحاط بالسلك. ويتعين التيار تماما بالتغير في عدد خطوط القوة التي تخترق السطح مهما كان السبب في حدوث هذا التغير. والتغير في عدد خطوط القوة هو الشيئ الوحيد الضروري لوصف التيار المنتج كميا أو نوعيا. "عدد خطوط القوى

يتغير" يعني أن تكاثف الخطوط يتغير، وهذا كما يذكر القارئ يعني أن شدة المجال تتغير. وهذه هي الحلقات الهامة في سلسلتنا المنطقية: تغير في مجال مغناطيسي ---->تيار منتج بالتأثير ----> حركة شحنة ----> وجود مجال كهربائي. وعلى ذلك: يصطحب المجال المغناطيسي المتغير بمجال كهربائي.

ذلك وجدنا أهم دعامتين لنظرية المجال الكهربائي والمغناطيسي. الدعامة الأولى هي العلاقة بين المجال الكهربائي المتغير المجال المغناطيسي. وقد ظهرت هذه العلاقة من تجربة أورستد على انحراف الإبرة المغناطيسي وأدت إلى النتيجة الآتية: يصطحب المجال الكهربائي المتغير بمجال مغناطيسي. أما الدعامة الثانية فهي تربط بين المجال المغناطيسي المتغير وبين التيارات المنتجة بالتأثير، وقد ظهر هذا الارتباط من تجربة فاراداي. وقد كانت كل من هاتين العلاقتين أساسا للوصف الكمي.

مرة أخرى يظهر المجال الكهربائي الذي يصاحب المجال المغناطيسي المتغير كأنه شئ حقيقي. وضحنا فيما سبق أن المجال المغناطيسي يكون موجودا رغم عدم وجود قطب الاختبار. بالمثل يجب أن نقول هنا أن المجال الكهربائي يوجد رغم عدم وجود السلك الذي يدل على وجود التيار المنتج بالتأثير.

وفي الواقع يمكن اختصار هاتين الدعامتين إلى دعامة واحدة ألا وهي نتيجة تجربة أورستد فمن الممكن استنتاج نتيجة تجربة فاراداي من تجربة أورستد وقانون بقاء الطاقة. ولقد استخدمنا الدعامتين لغرض التوضيح والاقتصاد فقط.

يجب ذكر نتيجة أخيرة للوصف بالمجال. نفرض أن لدينا دائرة يمر فيها تيار ونفرض أن مصدر التيار قد قطع فجأة. طبعا لا يوجد تيار الآن!. ولكن أثناء فترة قطع الاتصال الصغيرة تحدث عملية متداخلة معقدة، وهي عملية من الممكن التنبؤ بها من نظرية المجال. قبل قطع التيار كان يوجد مجال مغناطيسي. يتغير عدد خطوط القوة التي تخترق السطح المحدد بالسلك سريعا جدا، ولكن هذا التغير السريع مهما كان السبب في حدوثه، لا بد وأن يولد تيارا بالتأثير. والذي يهم في الواقع هو التغير في المجال المغناطيسي. والتيار المنتج بالتأثير يكون أشد كلما ازداد هذا التغير. هذه النتيجة هي اختبار جديد للنظرية. يجب أن يصاحب قطع التيار ظهور تيار شديد ولحظي منتج بالتأثير. ومرة أخرى يتحقق ذلك عمليا. وكل شخص قطع دائرة كهربائية لا بد وأن يكون قد لاحظ ظهور شرارة. تدل هذه الشرارة على الفرق الكبير في الجهد الذي يسببه التغير في المجال المغناطيسي.

ويمكننا النظر إلى هذه العملية من وجهة نظر أخرى هي وجهة نظر الطاقة. اختفى مجال مغناطيس وتولدت شرارة. الشرارة تمثل طاقة وإذن فلا بد أن يمثل المجال المغناطيسي طاقة. وإذا كنا سنستعمل فكرة

المجال ولغته باستمرار فلا بد وأن نعتبر المغناطيس كمستودع للطاقة، فبهذه الطريقة وحدها نتمكن من وصف الظواهر الكهربائية والمغناطيسية دون أن نناقض قانون بقاء الطاقة.

إن المجال الذي بدأ كنموذج معين أخذ يزداد واقعية. لقد ساعدنا على فهم حقائق قديمة وقادنا إلى حقائق جديدة. وإن ربط الطاقة بالمجال لهو خطوة إلى الأمام في الطور الذي أخذنا فيه نهتم بفكرة المجال ونحطم فكرة السيال أو المائع الضرورية لوجهة النظر الميكانيكية.

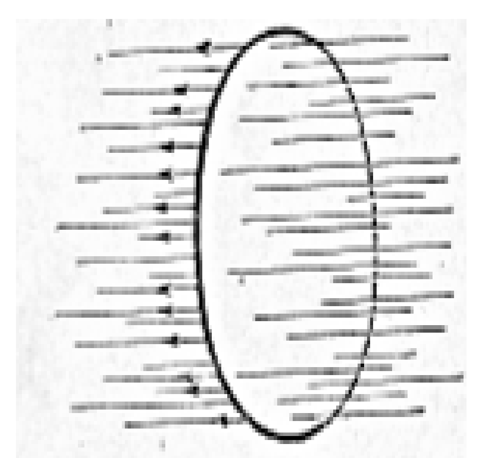
واقعية المجال:

يمكن تلخيص الوصف الكمي والرياضي لقوانين المجال في المعادلات المسماة بمعادلات ماكسويل، ولقد أدت الحقائق التي ذكرناها فيما سبق إلى صياغة هذه المعادلات ومع ذلك فهي تدل على أكثر مما أمكننا الإشارة إليه. وبساطة هذه المعادلات تخفي عمقها الذي لا يظهر إلا بالدراسة الدقيقة. وتعد صياغة هذه المعادلات أهم حدث في علم الطبيعة منذ عهد نيوتن. والسبب في ذلك هو أنه فضلا عن اتساع مجالها فهي تكون نموذجا لنوع جديد من القوانين.

ويمكن تلخيص معادلات ماكسويل (التي تظهر في جميع معادلات علم الطبيعة الحديث الأخرى) في جملة واحدة. معادلات ماكسويل هي قوانين تمثل تركيب المجال.

لماذا تختلف معادلات ماكسويل في الشكل والصفات عن معادلات الميكانيكا الكلاسيكية؟ وماذا نعني بقولنا أن هذه المعادلات تصف تركيب المجال؟ وكيف يمكننا باستعمال نتائج تجربتي أورستد وفاراداي تكوين نوع جديد من القوانين تثبت أهميته البالغة في التطورات التالية لعلم الطبيعة؟

لقد رأينا من تجربة أورستد كيف ينتج مجال مغناطيسي حول مجال كهربائي متغير. ورأينا من تجربة فاراداي كيف ينتج مجال كهربائي حول مجال مغناطيسي متغير. سنوجه اهتمامنا مؤقتا إلى إحدى هاتين التجربتين، إلى تجربة فاراداي مثلا، لنحصل على بعض الخواص المميز لنظرية ماكسويل. سنعتبر مرة أخرى الشكل الذي يمثل نشأة



تيار منتج بالتأثير من مجال مغناطيسي متغير. نعلم أن التيار ينتج بالتأثير إذا تغير عدد خطوط القوة التي تخترق السطح المحدد بالسلك. على ذلك يظهر التيار المنتج بالتأثير إذا تغير المجال أو إذا تغير شكل الدائرة أو إذا تحركت الدائرة. وإذا راعينا جميع هذه الاحتمالات، ودرسنا التأثيرات التي تنتج عن كل منها فمن المؤكد أن ذلك يؤدي إلى نظرية معقدة جدا. ولكن ألا يمكننا تبسيط هذه المسألة؟ دعنا نحذف من دراستنا كل ما يتعلق بشكل الدائرة وطولها والسطح المحدد بالسلك.

يتخيل أيضا أن الدائرة في الشكل السابق تصغر تدريجيا إلى أن تصبح دائرة كهربائية صغيرة جدا حول نقطة معينة في الفراغ. في هذه الحالة لا يكون لشكل الدائرة أو حجمها أي تأثير على دراستنا. في هذه العملية النهائية التي يؤول فيها المنحنى المقفل إلى نقطة يختفي كل من الشكل والحجم أوتوماتيكيا من دراستنا وتحصل على قوانين تربط بين التغير في المجال المغناطيسي والكهربائي عند نقطة اختيارية في الفراغ وعند لحظة اختيارية.

وعلى ذلك تكون هذه هي إحدى الخطوات الأساسية المؤدية إلى معادلات ماكسويل، ومرة أخرى هذه هي تجربة مثالية تجرى في الخيال بتكرار تجربة فاراداي على دائرة صغيرة تؤول في النهاية إلى نقطة.

يجب علينا أن نسمي ما سبق نصف خطوط بدلا من خطوة كاملة؛ فحتى الآن كان اهتمامنا موجها إلى تجربة فاراداي. ولكن يجب دراسة دعامة المجال الثانية المبنية على تجربة "أورستد" بطريقة مشابهة وبنفس الدرجة من الدقة. في هذه التجربة تلتف خطوط القوة المغناطيسية حول التيار. إذا جعلنا الخطوط الدائرة للقوة المغناطيسية تصغر وتؤول إلى نقطة نحصل على النصف الثاني للخطوة، وتعطينا الخطوة كلها علاقة بين التغير في كل من المجالين الكهربائي والمغناطيسي عند نقطة اختيارية في الفراغ، وعند لحظة اختبارية.

ولكن تلزم خطوة أخرى أساسية، حسب تجربة بارادي يجب أن يوجد سلك يدل على وجوه المجال الكهربائي كما يجب أن يوجد قطب مغناطيسي أو إبرة مغناطيسية لاختبار وجود مجال مغناطيسي في تجربة أورستد، ولكن نظرية ماكسويل الجديدة تذهب إلى أبعد من هذه الحقائق العملية؛ فحسب نظرية ماكسويل: المجال الكهربائي والمغناطيسي أو بالاختصار المجال الكهرومغناطيسي هو شيء حقيقي واقعي؛ فالمجال المغناطيسي المتغير يولد مجالا كهربائيا بصرف النظر عن وجود أو عدم وجود سلك يدل على وجود هذا المجال، والمجال الكهربائي المتغير يولد مجالا مغناطيسيا بصرف النظر عن وجود أو عدم وجود قطب مغناطيسي للدلالة على وجوده.

أي أن هناك خطوتين قد أدتا إلى معادلات ماكسويل. الخطوة الأولى: عند دراسة تجربتي أورستد ورولاند كان من الضروري أن يصغر كل من خط المجال المغناطيسي الدائري الملتف حول التيار والمجال الكهربائي المتغير ويؤول إلى نقطة، وعند دراسة تجربة فاراداي كان من الضروري أن يصغر خط المجال الكهربائي الدائري الملتف حول المجال المغناطيسي المتغير ويؤول إلى نقطة. والخطوة الثانية هي النظر إلى المجال على أنه شيء حقيقي واقعي، فالمجال الكهرومغناطيسي بمجرد تولده يؤثر ويتغير حسب قوانين ماكسويل. ومعادلات ماكسويل تصف تركيب المجال الكهرومغناطيسي، وتطبيق هذه المعادلات عند أي نقطة في الفراغ على عكس القوانين الميكانيكية التي لا تطبق إلا حيث توجد مادة أو شحنات.

ونحن نذكر كيف كانت الحالة في الميكانيكا. إذا علمت القوة المؤثرة على جسيم عند أي لحظة وسرعة وموضع الجسيم عند لحظة واحدة فقط فإن من الممكن التنبؤ بمسار الجسيم. وفي نظرية ماكسويل إذا علمنا المجال عند لحظة واحدة فقط يمكننا باستخدام معادلات النظرية استنتاج الكيفية التي يتغير بها المجال عند أية لحظة وعند أي نقطة في الفراغ. تمكننا معادلات ماكسويل من تتبع تاريخ المجال كما تمكننا المعادلات الميكانيكية من تتبع تاريخ الجسيمات المادية، ولكن لا يزال هناك فرق أساسي بين القوانين الميكانيكية وقوانين ماكسويل. إذا قارنا قوانين نيوتن للجاذبية وقوانين ماكسويل للمجال تتضح بعض الخواص المميزة التي تعبر عنها هذه المعادلات.

بمساعدة قوانين نيوتن يمكننا استنتاج حركة الأرض من القوة المؤثرة بين الشمس والأرض، وهذه القوانين تربط بين حركة الأرض وبين تأثير الشمس (البعيدة جدا) عليها؛ فالأرض والشمس رغم كبر البعد بينهما تمثلان معا في مسرحية القوى.

في نظرية ماكسويل لا يوجد ممثلون ماديون. تعبر المعادلات الرياضية لهذه النظرية عن القوانين التي يتبعها المحلل الكهرومغناطيسي، وهي – على خلاف قوانين نيوتن – لا تربط بين حديثين بعيدين جدا. فهي لا تربط بين ما يحدث هنا بالظروف هناك. فالمجال في مكان ما في لحظة معينة يتوقف على المجال في الحوار المباشر عند اللحظة السابقة. إذا علمنا ما يحدث عند نقطة معينة الآن فإن معادلات

ماكسويل تمكننا من التنبؤ بما سيحدث في الحوار المباشر لهذه النقطة بعد زمن قليل. تمكننا هذه المعادلات من زيادة معلوماتنا عن المجال بخطوات قصيرة، ويمكننا استنتاج ماذا يحدث هنا من الذي حدث في مكان بعيد، بجمع هذه الخطوات القصيرة جدا.

أما في نظرية نيوتن فلا يسمح إلا بخطوات كبيرة تربط بين أحداث بعيدة، ويمكن الحصول مرة ثانية على نتائج تجربتي فاراداي وأورستد من نظرية ماكسويل عن طريق واحد هو جمع خطوات صغيرة كل منها يتبع معادلات ماكسويل.

تبين الدراسة الرياضية الدقيقة لمعادلات ماكسويل أنه يمكن استنتاج نتائج جديدة وغير متوقعة، ويمكن اختبار النظرية اختبارا قاسيا لأن النتائج النظرية لها الآن صفة كمية ويكشف عنها بواسطة سلسلة كاملة من الحجج المنطقية.

لنتخيل مرة أخرى تجربة مثالية، قوة خارجية تؤثر فتجعل كرة مشحونة بالكهرباء تتذبذب بسرعة بحيث تكون حركتها مثل حركة البندول. كيف سنستخدم معلوماتنا عن تغيرات المجال في وصف كل ما يحدث هنا بلغة المجال؟

تحدث ذبذبة الشحنة مجالا كهربائيا متغيرا، وهذا يصطحب دائما بمجال مغناطيسي متغير إذا وضع سلك يكون دائرة مقفلة بالقرب من الشحنة فإن المجال المغناطيس المتغير يصطحب بتيار كهربائي في

الدائرة. ليس كل هذا إلا تكرارا لحقائق معلومة، ولكن دراسة معادلات ماكسويل تجعلنا نمعن النظر في مسألة الشحنة الكهربائية المتذبذبة.

بتطبيق معادلات ماكسويل رياضيا يمكننا العثور على صفات المجال المحيط بشحنة متذبذبة، وعلى تركيبه بالقرب من المصدر وبعيدا عنه، وعلى تغيرات هذا المجال بمرور الزمن. ونتيجة هذا التطبيق هو الموجة الكهرومغناطيسية. الشحنة المتذبذبة التي تتحرك بسرعة معينة في الفراغ تشع طاقة ولكن تحويل الطاقة – أي حركة حالة من حالات المادة – يميز جميع الظواهر الموجية.

لقد درسنا أنواعا مختلفة من الأمواج، كأن لدينا الموجات الطولية التي تنتج عن الكرة النابضة حيث تنتقل تغيرات الكثافة خلال الوسط. وكان لدينا أيضا الوسط الغروي الذي تنتشر فيه الموجات المستعرضة، ما هو نوع التغيرات التي تنتشر في حالة الموجة الكهرومغناطيسية؟ مجرد تغيرات المجال الكهرومغناطيسي! كل تغير في مجال كهربائي ينتج مجالا مغناطيسيا، وكل تغير في مجال مغناطيسي ينتج مجالا كهربائيا، كل تغير في..... وهكذا. وحيث أن المجال يمثل طاقة فإن جميع هذه التغيرات المنتشرة في الفراغ بسرعة معينة تنتج موجة. وكما نستنتج من النظرية: تقع جميع خطوط القوة الكهربائية والمغناطيسية دائما في مستويات عمودية على اتجاه الانتشار، على ذلك تكون الموجه الناتجة مستعرضة.

لا تزال الصفات الأصلية لصورة المجال التي كوناها من تجربتي أورستد وفارادي محتفظا بها، ولكننا نتحقق الآن من أن لها معنى أعمق. تنتشر الموجة الكهرومغناطيسية في الفراغ المطلق، ومرة أخرى هذه نتيجة للنظرية، إذا توقفت الشحنة المتذبذبة فجأة عن الحركة فإن المجال يصبح مجالا إلكتروستاتيكيا. ولكن سلسلة الأمواج التي ولدتها حركة الشحنة تستمر في الانتشار، ويكون للموجات وجود مستقل ويمكن تتبع تاريخها كما تتبع تاريخ أي شئ مادي آخر.

نفهم الآن لماذا تنشأ الصورة التي كوناها للموجة الكهرومغناطيسية التي تنتشر بسرعة معينة في الفراغ، والتي تتغير مع الزمن من معادلات ماكسويل، السبب الوحيد لذلك هو أن هذه المعادلات تصف تركيب المجال الكهرومغناطيسي عند أي نقطة في الفراغ وعند أية لحظة.

هناك سؤال آخر في غاية الأهمية: ما هي السرعة التي تنتشر بها الموجة الكهرومغناطيسية في الفراغ المطلق؟.. تعطينا النظرية بمساعدة بعض الإحصائيات التي نحصل عليها من تجارب بسيطة لا علاقة لها بالانتشار الفعلي للأمواج، إجابة واضحة: سرعة الموجة الكهرومغناطيسية تساوى سرعة الضوء.

لقد كونت تجربتا أورستد وفاراداي الأساس الذي بنيت عليه قوانين ماكسوبل، وجميع النتائج التي حصلنا عليها حتى الآن نتجت عن الدراسة الدقيقة لهذه القوانين معبرا عنها بلغة المجال. ويعد الاكتشاف

النظري الذي يعين السرعة التي تنتشر بها الموجة الكهرومغناطيسية على أنها سرعة الضوء من أعظم الاكتشافات في تاريخ العلم.

وقد حققت التجربة ما تنبأت به النظرية؛ فمنذ أكثر من خمسين عاما أثبت هرتز بالتجربة لأول مرة وجود الموجات الكهرومغناطيسية وحقق عمليا أن سرعتها تساوي سرعة الضوء. وفي هذه الأيام يشاهد ملايين الناس الموجات الكهرومغناطيسية ترسل وتستقبل. والواقع أن أجهزتهم أعقد بكثير جدا من ذلك الذي استعمله هرتز، وهي تشعر بوجود الموجات على بعد آلاف الأميال من مصدرها بدلا من مجرد ياردات قليلة.

المجال والأثير:

تعرف الموجة الكهرومغناطيسية بأنها موجة مستعرضة تنتشر في الفضاء بسرعة الضوء. ويوحي إلينا وجود سرعة واحدة للأمواج الضوئية والكهرومغناطيسية بضرورة وجود علاقة قوية بين الظواهر الضوئية والكهرومغناطيسية نفسها.

وعندما كان علينا أن نفاضل بين نظرية الجسيمات والنظرية الموجية، فضلنا النظرية الموجية لنجاحها في شرح ظاهرة الحيود. فإذا فرضنا الآن أن الموجة الضوئية هي في الحقيقة موجة كهرومغناطيسية فإن هذا الفرض لن يؤثر البتة في تفسيرنا للظواهر الضوئية، بل على العكس يمكننا من استخلاص نتائج جديدة أخرى، وإذا كان هذا الفرض صحيحا

فلا بد من وجود ارتباط ما بين الخواص الضوئية والكهربائية للمادة، يسهل استنتاجه من النظرية. ويعتبر إيجاد هذا الارتباط وتحقيقه بالتجارب نصرا مبينا للنظرية الكهرومغناطيسية.

ويعتبر هذا النصر أيضا انتصارا لنظرية المجال، إذ قد أمكننا تمثيل فرعين من العلوم مختلفين عن بعضهما بنظرية واحدة، فنظرية ماكسويل تشرح مثلا ظاهرة التأثير الكهربائي وظاهرة انكسار الضوء. وينحصر الاختلاف بين الأضواء التي تشعر بها العين وبين الأمواج الكهرومغناطيسية الأخرى في أن طول الموجة في الحالة الأخيرة قد يقصر حتى يصل إلى أطوال الأضواء الأولى، وقد يزداد كثيرا كما هي الحال في الأمواج التي يستقبلها المذياع. أي أن الاختلاف فقط هو في أطوال الموجات.

وقد كانت النظرية الميكانيكية القديمة تهدف إلى شرح جميع الظواهر الطبيعية على أساس وجود قوى بين الجسيمات المادية. وعلى هذا الأساس ابتدعت فكرة السيال الكهربائي، إذ كان من العسير على علماء القرن التاسع عشر تصور فكرة المجال، فكانوا لا يفكرون إلا في المادة وتطوراتها وكل ما يتعلق بها.

وقد كان الغرض من استحداث فكرة الأثير في بدء الأمر هو المساعدة في تفهم الظواهر الطبيعية على الأساس الميكانيكي المادي، فحاولوا مثلا شرح القوة الموجودة بين جسمين مشحونين بالكهرباء

بأسباب خاصة بالجسمين. أما الآن فإنه يجب علينا – طبقا للآراء الحديثة الخاصة – أن نعتبر المجال الموجود بين الشحنتين – لا الشحنتين نفسهما – إذا أردنا دراسة تأثيرهما. وقد أخذ الاعتقاد بنظرية المجال يزداد قوة ووضوحا وأخذت النظرية الميكانيكية في الاضمحلال وأدرك العلماء أن علم الطبيعة قد أشرف على فجر عهد جديد تحتل فيه نظريات المجال مكانا كبيرا، وأصبحنا الآن مثلا ننظر إلى المجال الكهرومغناطيسي كنظرنا إلى شيئ ملموس تماما مثل المكتب الذي نجلس إليه.

ومن الإنصاف أن نذكر أن نظرية المجال الحديثة لم تقض على آثار النظرية الميكانيكية، بل إنها قد أظهرت بعض محاسن هذه النظرية الأخيرة فضلا عن مواطن الضعف فيها. ولسنا نقصد في كلامنا هذا نظريات السيال والمجال الكهربائيين فقط بل كل الظواهر الطبيعية فمازلنا مثلا نعترف بوجود الشحنة الكهربائية نفسها رغما عن اعتقادنا – حسب نظرية المجال – بأن الشحنة ما هي إلا مصدر للمجال الكهربائي. وكذلك أيضا مازلنا نعتقد في صحة قانون كولوم واحتواء معادلات ماكسويل له. وهكذا يمكننا استخدام بعض المعتقدات القديمة في حدود لا يجب أن نتعداها.

ولكي نفهم حقيقة هذا التغيير يجب أن نذكر أن تكوين نظرية جديدة لا يشبه هدم كوخ حقير وبناء ناطحة سحاب بدلا منها بل أقرب شبها بحال رجل يتسلق جبلا فيتسع أفق نظره ويرى آفاقا جديدة كلما

ازداد ارتفاعه، ويرى طرقا ومسالك جديدة تصل بين البقاع الموجودة في سفح الجبل مما كان يتعذر عليه رؤيتها لو لم يبرح هذا السفح.

وفي الحقيقة أنه قد مضى زمن طويل قبل أن يستطيع الناس فهم الكنه الحقيقي لمعادلات ماكسويل، فكأن العلماء أولا يشبهون المجال بالمادة ويحاولون استخدام فرض الأثير لفهم هذه المعادلات. ولكن الزمن كان خير كفيل بإنجاح فكرة المجال؛ فسرعان ما تعاقبت انتصاراتها وزاد إيمان الناس بها وفقدت تبعا لذلك نظرية الأثير الكثير من بهائها ورونقها وأخذ الناس في الانصراف عنها.

وهكذا أصبح علينا الآن أن نسلم بأن الفراغ له خاصية السماح للأمواج الكهرومغناطيسية بالمرور. وقد يحدث بين الحين والآخر أن نذكر عرضا كلمة الأثير، ولن تعني هذه الكلمة أكثر من الصفة الطبيعية التي ذكرناها الآن والتي تميز الفراغ. ونرى من هذه التطورات الكثيرة التي لازمت فكرة الأثير منذ ولادتها فلم يصبح الآن يعني وسطا مكونا من جسيمات مادية بل مجرد صفة طبيعية للفراغ. وللأثير دور كبير أيضا في نظرية النسبة سنتكلم عنه فيما بعد.

السقالة الميكانيكية:

لنرجع الآن قليلا إلى الوراء ونعتبر قانون جاليليو للقصور الذاتي: "كل جسم يظل في حالة سكون أو حركة منتظمة في خط مستقيم ما لم تؤثر عليه قوة خارجية"؛ لنتصور أنفسنا الآن نشاهد عالما يريد تحقيق

صحة هذا القانون أو عدمها بواسطة التجارب العملية. سيدفع العالم كرات صغيرة على سطح منضدة أفقية ملساء، وسيلاحظ أن حركة الكرات تصبح أكثر انتظاما كلما قل مقدار الاحتكاك بين الكرة وسط المنضدة.

لندع الآن العالم يجري تجاربه، ونتصور أن الحجرة قد أخذت في الدوران فجأة في مستو أفقي حول محور في وسطها. سيشاهد العالم أن الكرة ذات الحركة المنتظمة أخذت في حركتها تقترب من طرف المنضدة الأكثر قربا من جدران الحجرة أي الأكثر بعدا عن مركز الحجرة ومحور الدوران. بل إن العالم نفسه سيشعر بقوة غريبة تدفعه نحو جدران الحجرة، سيحس بنفس الشعور الذي يعانيه راكبو القطار عندما يتحرك هذا الأخير في مسار دائري، أو كشعور راكب الأرجوحة السريعة الدوران. وفي هذه الحالة سيجد العالم أنه لا مندوحة من نبذ قانون القصور الذاتي وجميع القوانين الميكانيكية في عالمه – أي حجرته – السريعة الدوران حول المحور.

فإذا تصورنا شخصا ولد وقضى كل حياته داخل هذه الحجرة الدائرة فإن قوانين الحركة التي سيشاهدها داخل الحجرة ستختلف تماما الاختلاف عن القوانين التي تخضع لها الأجسام خارج الغرفة. ولكن إذا دخل امرؤ الحجرة وهو عالم تماما بحركتها الدورانية وملم بقوانين الطبيعة فإنه سيفسر عدم صلاحية القوانين الميكانيكية داخل الحجرة بأنه

راجع لهذا الدوران، ويمكنه إجراء بعض تجارب لمعرفة هذه الحركة الدورانية.

ولعلك نتساءل عن سبب اهتمامنا بالحجرة السريعة الدوران.. والجواب على ذلك هو أننا – نحن معشر سكان الكرة الأرضية – في نفس وضع العالم الذي قضي عليه بالبقاء داخل الحجرة الدائرة طيلة حياته، إذ أننا قد أدركنا منذ عهد كوبرنيكوس أن الأرض تدور حول نفسها وحول الشمس أيضا في نفس الوقت، فإذا كان العالم الطبيعي لم يستطع إثبات قوانين الميكانيكا داخل الحجرة الدائرة؛ فإننا أيضا لن نستطيع تحقيقها على سطح الأرض، ولكن حيث أن حركة الأرض الدورانية بسيطة نسبيا فإن تعديل قوانين الميكانيكا سيكون طفيفا. وهناك تجارب كثيرة تدلنا على وجود اختلاف بسيط في قوانين الميكانيكا مما يدلنا على صحة الفرض بحركة الأرض الدورانية.

ومما يدعو إلى الأسف أنه ليس في استطاعتنا اختيار مكان بين الشمس والأرض يمكننا البقاء به لاختبار صلاحية قوانين الميكانيكا، وحتى نرى بأعيننا حركة الأرض الدورانية. وإذا فلا مفر أن نجري تجاربنا على سطح الأرض التي نقضي حياتنا فيها، ويمكننا التعبير عن هذه الحقيقة رياضيا بقولنا إن الأرض هي محاورنا الإحداثية".

ولكي نفهم معنى هذه العبارة الرياضية سنذكر المثال: إذا التقينا حجرا من قمة برج عال فإنه يمكننا تعيين ارتفاع هذا الحجر عن سطح

الأرض عند أي لحظة أثناء سقوطه، وذلك بتثبيت مقياس كبير بجوار البرج نستطيع بواسطته تعيين هذه الارتفاعات. والمفروض طبعا أن البرج والمقياس ليسا مصنوعين من المطاط أو أي مادة يحتمل أن يتغير شكلها أثناء التجربة. وفي الحقيقة أن ما نحتاج إليه لإجراء هذه التجربة – أي تعيين ارتفاعات الحجر أثناء سقوطه – لا يعدو المقياس المتماسك وساعة دقيقة فقط، فإذا توفر لدينا ذلك أمكننا تجاهل شكل البرج، بل وحتى مجرد وجوده. وعند إجراء هذه التجربة لا نذكر عادة وجود المقياس والساعة حيث أن وجودها مفروض بالبديهة ولا بد منه لتحقيق قانون جاليليو للأجسام الساقطة.

وبفصل هذا الجهاز البسيط – أي المقياس والساعة – يمكننا تحقيق هذا القانون الميكانيكي لدرجة معينة من الدقة، وسنرى أن هناك فرقا بين النتائج المستنتجة نظريا من القانون الميكانيكي وبين النتائج العملية الناتجة من استخدام المقياس والساعة وذلك بسبب دوران الأرض. ويمكننا التعبير عن ذلك رياضيا أيضا بقولنا: إن قوانين الميكانيكا – على الصورة التي سبق ذكرها – لا تتحقق تماما في المحاور الإحداثية المثبتة في سطح الأرض.

ومن الطبيعي أنه يلزمنا في جميع التجارب الميكانيكية على الإطلاق تعيين أماكن نقاط مادية عند لحظات معينة، كما حدث عند دراستنا للجسم الساقط من قمة البرج، ولكن يجب ألا يغيب عن بالنا أن موضع الجسم الساقط في أية لحظة يجب أن ينسب إلى شيئ ما

كالبرج أو المقياس، إذ لا بد من وجود إحداثيات تشير إليها كسقالة ميكانيكية حتى نستطيع تعيين أماكن الأجسام. وهذا ما يحدث عند تعيين أماكن الأفراد والمباني في مدينة ما إذ تكون شبكة الطرق والميادين مجموعة إحداثية نشير إليها. وعندما ذكرنا قوانين الميكانيكا فيما سبق لم نهتم بتعيين الإحداثيات، لأننا بسبب وجودنا على سطح الأرض لن نجد أية صعوبة في اختبار إحداثيات ما وتثبيتها على سطح الأرض.

ولم نشر بشيء إلى الإحداثيات المتبعة في جميع القوانين والفروض الطبيعية التي سبق ذكرها حتى الآن، بل حتى تجاهلنا مجرد وجودها؛ فمثلا عندما ذكرنا "يتحرك الجسم بانتظام" كان يجب علينا أن نكتب: "يتحرك الجسم بانتظام بالنسبة إلى إحداثيات معينة". ولا غرو فقد علمتنا تجربة الحجرة السريعة الدوران أن نتائج التجارب الميكانيكية قد تتوقف على الإحداثيات المختارة.

وإذا فرضنا أن لدينا مجموعتين من الإحداثيات تدور كل منهما بالنسبة للأخرى فإن قوانين الميكانيكا لن تتحقق في كليهما معا، فإذا اتخذنا سطح الماء الساكن في حوض سباحة مثلا أساسا لإحداثياتنا فإن سطح الماء في حوض سباحة آخر – يتحرك حركة دورانية سريعة بالنسبة للأول – لن يكون أفقيا في هذه الإحداثيات، بل يتخذ الشكل الذي يأخذه سطح اللبن في كوب عندما تحركه بواسطة ملعقة صغيرة. وعندما بدأنا صياغة قواعد الميكانيكا فاتنا أن نذكر شيئا مهما، ألا وهي

الإحداثيات التي تتحقق فيها هذه القوانين. لنسرع بالمرور على هذه النقطة ولنقدم الفرض التقريبي بأن هذه القوانين تتحقق في كل الإحداثيات المثبتة في سطح الأرض، وبذلك تتحدد جميع نتائجنا بالنسبة إلى الإحداثيات معينة. هذا على الرغم من أن سطح الأرض لا يصلح تماما لكي نتخذه كأساس لمجموعة إحداثية.

لنفرض إذن أن لدينا مجموعة من الإحداثيات تتحقق فيها قوانين الميكانيكا، ولنتساءل الآن عما إذا كانت هذه المجموعة هي الوحيدة؟ لنحاول اتباع إحداثيات أخرى كقطار أو سفينة أو طائرة مثلا متحركة بالنسبة للأرض، ولنبحث الآن فيما إذا كانت قوانين الميكانيكا ستظل نافذة بشكلها المألوف في هذه الإحداثيات الجديدة. وتدلنا أمثلة القطار المتحرك في مسار منحن، أو السفينة المدفوعة بعاصفة، أو الطائرة التي تدور حول نفسها – على قوانين الميكانيكا هذه – لن تكون صحيحة على الإطلاق، لنبدأ الآن بدراسة تجربة بسيطة تعتبر فيها مجموعة إحداثية معينة متحركة بسرعة منتظمة بالنسبة لإحداثياتنا المفروضة، أي التي تتحقق فيها قوانين الميكانيكا، أي كقطار أو سفينة تتحرك بسرعة ثابتة في خط مستقيم. تدلنا المشاهدات العملية في مثل هذه الأحوال على أن التجارب التي سنقوم بها في القطار أو السفينة ستعطينا نفس النتائج التي نحصل عليها لو أجرينا هذه التجارب على سطح الأرض. ولكن إذا وقف القطار على حين غرة أو ازدادت سرعته فجأة أو إذا اشتد هياج البحر فإننا نشاهد حدوث ظواهر غريبة؛ فنشاهد سقوط الحقائب والأمتعة في القطار، ويختل توازن الموائد والمقاعد وتتأثر هنا

وهناك فوق السفينة ويشعر المسافرون بدوار البحر. ويدلنا ذلك كله من الناحية الطبيعية العلمية بأن قوانين الميكانيكا لا يمكن أن تتحقق أو تطبق على مثل هذه الإحداثيات، أي أن هذه الإحداثيات تعتبر غير ملائمة.

ويمكننا التعبير عن هذه النتيجة بنظرية جاليليو النسبية: إذا كانت قوانين الميكانيكا صحيحة في إحداثيات معينة، فإنها ستظل متحققة في أية إحداثيات أخرى متحركة بسرعة منتظمة بالنسبة للأولى، فإذا كانت لدينا مجموعتان من الإحداثيات تتحركان بغير انتظام بالنسبة لبعضهما فإن قوانين الميكانيكا لا يمكن أن تتحقق في كليهما. وتسمى الإحداثيات التي تتحقق فيها قوانين الميكانيكا بإحداثيات القصور الذاتي.

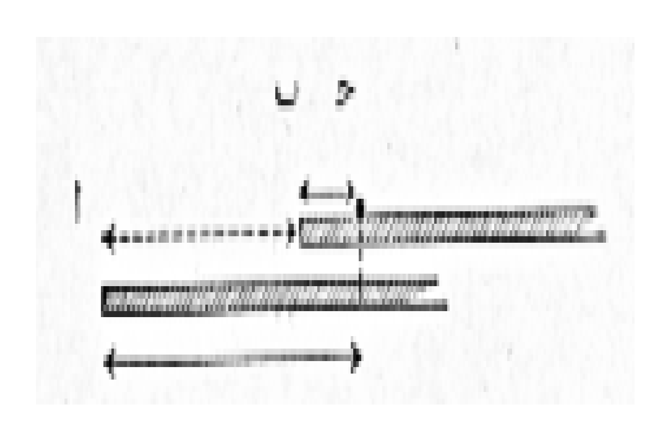
لنعتبر الآن مجموعتين إحداثيتين في نقطة، لنفرض أن إحداهما بدأت تتحرك بسرعة منتظمة بالنسبة للأخرى، كقطار أو سفينة تتحرك بالنسبة إلى سطح الأرض مثلا، سنجد أننا نستطيع تحقيق قوانين الميكانيكا لنفس الدرجة من الدقة في كل من الأرض والقطار أو السفينة المتحركين بانتظام. ولكن إذا وقع حدث ما، وحاول مشاهدة أن كل منهما في مجموعة إحداثية مختلفة، وتسجيل نتائجه فإن المسألة تصبح أكثر تعقيدا. فلنفرض الآن أننا حاولنا دراسة حركة نقطة مادية من مجموعتين إحداثيتين مختلفتين كالأرض وقطار متحرك بسرعة منتظمة مثلا . نظرا إلى أن هاتين المجموعتين هما من نوع إحداثيات القصور

الذاتي، فإنه يكفي أن نعلم النتائج التي سجلها أحد المشاهدين والسرعة النسبية، وأماكن المجموعتين عند لحظة معينة لكي نستطيع أن نوجد النتائج التي سيجدها المشاهد الآخر. إذ أنه من المهم جدا لوصف الأحداث أن نعرف كيف ننتقل من مجموعة إحداثية إلى أخرى، حيث أنهما متكافئتان ومناسبتان لوصف أحداث الطبيعة، وبذلك نستطيع معرفة النتائج التي يحصل عليها مشاهد في إحدى المجموعتين من تلك التي يجدها آخر في المجموعة الثانية.

لندرس الآن المسألة من الناحية المجردة دون ذكر سفينة أو قطار أو غيره، ولنعتبر الحركة في خطوط مستقيمة. سنفرض أن لدينا مقياسا متماسكا وساعة دقيقة. وفي حالة الحركة في خط مستقيم سيكون المقياس هو مجموعتنا الإحداثية، كما كان مقياس البرج في تجربة جاليليو. ومن الأسهل دائما أن نعتبر مجموعتنا الإحداثية في حالة الحركة في خط مستقيم كقضبان مقاييس متماسكة، وفي حالة الحركة في الفراغ، كسقالة متماسكة مصنوعة من قضبان رأسية وأفقية.

لنفرض أن لدينا مجموعتين من الإحداثيات، أي مقياسين متماسكين ولنمثلهما بخطين مستقيمين أحدهما فوق الآخر، ولنطلق عليهما الإحداثيات العليا والسفلى ولنفرض أيضا أن هاتين المجموعتين تتحركان بسرعة نسبية معينة كل بالنسبة لآخر أو بعبارة أخرى أن أحد المستقيمين ينزلق فوق الآخر. ولعله من الأنسب أن نفرض أن هذين المقياسين لهما طولان لا نهائيان، وأنه ليس لدينا سوى ساعة واحدة،

حيث أن الزمن يسير بمعدل واحد في كلا المجموعتين. ولنفرض أنه عند بدء التجربة كانت نقطتا ابتداء المقياسين منطبقتين، أي أنه عند هذه اللحظة كانت لهما نفس أرقام التدريج ولكن هذه الأرقام ستختلف عند الحركة بالطبع. لنفرض الآن أن هناك نقطة مادية مثبتة في المقياس العلوي، وإذن فسيكون الرقم المحدد لموضعها على المقياس العلوي ثابتا بمرور الزمن في حين أن الرقم المعين لموضعها على المقياس السفلي سيتغير لاستمرار. دعنا نستبدل العبارة "الرقم المعين لموضع النقطة على المقياس" باللفظ المرادف "أحداثها".



وكما هو مبين في الشكل يمكننا القول بأن إحداثي الجسيم المادي في المجموعة الإحداثية السفلى (أي الطول أ ج) يساوي إحداثي الجسيم في المجموعة العليا (أ ي ب ج) مضافا إليه إحداثي نقطة الابتداء، (أ ي أ ب). أي أننا يمكننا دائما تقدير موضع جسيم في مجموعة إحداثيات معينة إذا عرفنا موضعه في مجموعة أخرى، ولهذا السبب يجب علينا أن نعرف الأوضاع النسبية للمجموعتين الإحداثيتين

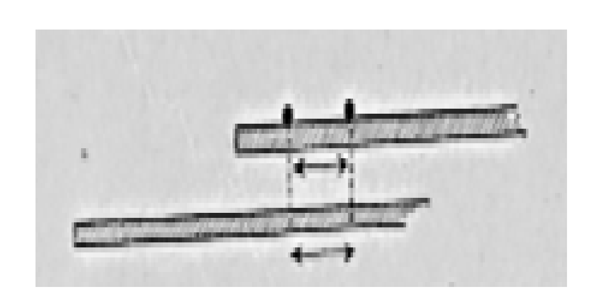
في كل لحظة، وليعذرنا القارئ لهذا الإسهاب في النقطة البسيطة ولذلك لفائدته فيما سيلي بعد ذلك، ويجدر بنا أن نلاحظ الفرق بين تعيين مكان نقطة ما وقعت وقوع حدث معين، إذ أن لكل شاهد مقياسه الخاص به (أي مجموعته الإحداثية) في حين أن ليست هناك سوى ساعة توقيت واحدة، أي أن الزمن يبدو كشيء مطلق واحد بالنسبة لجميع المشاهدين في المجموعات المختلفة.



وسنذكر الآن مثلا آخر: يتجول رجل على سطح سفينة كبيرة بمعدل ثلاثة أميال في الساعة، أي أن هذه هي سرعته النسبية بالنسبة إلى السفينة، أو بعبارة أخرى بالنسبة إلى إحداثيات مثبتة في السفينة فإذا كانت سرعة السفينة ثلاثين ميلا في الساعة بالمسبة إلى الشاطئ، وإذا كان اتجاه سرعة السفينة وحركة الرجل المنتظمتين في نفس الاتجاه فإن سرعة الرجل تكون ثلاثة وثلاثين ميلا في الساعة بالنسبة إلى مشاهد قابع بالشاطئ أو ثلاثة أميال بالنسبة إلى شاهد جالس على ظهر السفينة. أي أننا يمكننا التعبير عن هذه الظاهرة بشكل عام كما يلي: "تكون بسرعة نقطة مادية بالنسبة للإحداثيات السفلى مساوية لسرعتها بالنسبة

للإحداثيات العليا مضافا إليها أو مطروحا منها سرعة الإحداثيات العليا على حسب ما إذا كانت السرعتان في اتجاه واحد أو اتجاهين مختلفين"، وإذن فليست الأوضاع فقط بل وكذلك السرعات هي التي يمكننا دائما تحويل قيمها من إحداثيات معينة إلى أخرى إذا علمنا سرعة المجموعتين الإحداثيتين النسبية. أي أن الأماكن والسرعات هي أمثلة للكميات التي تختلف قيمها باختلاف الإحداثيات وترتبط ببعضها بواسطة قوانين تحويل.

ومع ذلك فهناك كميات لا تتغير قيمها في كلا المجموعتين الإحداثيتين، وإذن فلا تحتاج إلى قوانين تحويل. لنعتبر مثلا نقطتين مثبتتين على المقياس العلوي ولنقس المسافة بينهما. ستكون هذه المسافة هي الفرق بين أحداثي النقطتين اللتين تنحصر بينهما. وإذا أردنا تعيين أماكن هاتين النقطتين بالنسبة لإحداثيات أخرى، فإننا سنحتاج إلى استخدام قوانين تحويل. ولكن حينما نهتم بالفرق بين موضعي النقطتين فإن تأثير الإحداثيات المختلفة يتلاشى كما هو موضح في الرسم. وإذن فالمسافة بين نقطتين هي "كمية لا متغيرة" أي أنها لا تتوقف على طريقة اختبار الإحداثيات.



والمثال الثاني للكمية التي لا تتوقف على الإحداثيات هو التغير في السرعة وهي كمية مألوفة في الميكانيكا. سنفرض مرة أخرى أن لدينا مشاهدين يلاحظان حركة نقطة مادية في خط مستقيم. سيكون التغير في سرعة هذه النقطة بالنسبة لكل مشاهد في مجموعته، هو فرق بين سرعتين وبذلك سيختفي كل أثر للسرعة النسبية المنتظمة للمجموعتين، عند حساب هذا الفرق. وإذن ينتج أن التغير في السرعة هو كمية "لا متغيرة" على أساس الفرض بأن الحركة النسبية للمجموعتين منتظمة. أما في الحالة التي تكون فيها السرعة النسبية متغيرة فإن التغير في السرعة سيختلف في كلا من المجموعتين بسبب اختلاف السرعة النسبية بين المقياسين الممثلين للمجموعتين الإحداثيتين.

وهناك المثال الأخير: لنفرض أن لدينا نقطتين ماديتين بينهما قوة تتوقف فقط على المسافة بينهما؛ ففي حالة السرعة النسبة المنتظمة. ستظل المسافة بين النقطتين وكذلك القوة ثابتة، وحيث أن قانون نيوتن يربط بين القوة والتغير في السرعة، فإننا نستنتج أن هذا القانون سيتحقق في كلا المجموعتين. أي أننا قد توصلنا مرة أخرى إلى النتيجة التي حققها المشاهدات اليومية وهي: إذا تحققت قوانين الميكانيكا في مجموعة إحداثية فإنها تستمر كذلك في جميع الإحداثيات المتحركة بسرعة منتظمة بالنسبة للمجموعة الأولى.

وقد استخدمنا في أمثلتنا السابقة الحركة في خط مستقيم حيث يمكننا تمثيل المجموعات الإحداثية بمقاييس متماسكة، ولكن النتائج التي حصلنا عليها صحيحة وعامة ويمكننا تلخيصها فيما يلي:

١ – ليست لدينا أية وسائل لإيجاد مجموعات إحداثية قاصرة فإننا نستطيع تكوين عدد لا نهائي منها، حيث أن كل المجموعات الإحداثية التي تتحرك بانتظام بالنسبة لبعضها تصبح إحداثيات قاصرة، إذا كانت إحداها كذلك.

٢ – زمن وقوع حدث ما ثبت في جميع المجموعات الإحداثية، ولكن الإحداثيات والسرعات تختلف على حسب قوانين التحويل بين الإحداثيات.

٣ – على الرغم من اختلاف السرعات والإحصائيات عند تحويلها من مجموعة إلى أخرى، فإن القوة والتغير في السرعات، وبالتالي قوانين الميكانيكا تظل ثابتة بالنسبة إلى قوانين التحويل.

وسنطلق على قوانين التحويل الخاصة بالإحداثيات والسرعات في الميكانيكا الكلاسيكية: قوانين التحويل الكلاسيكية أو باختصار "التحويل الكلاسيكي".

الأثير والحركة:

تعتبر نظرية جاليليو النسبية صحيحة بالنسبة للظواهر الميكانيكية، أي أن قوانين الميكانيكا تتحقق في جميع المجموعات الإحداثية القاصرة المتحركة بالنسبة لبعضها. ولعلنا نتساءل عما إذا كان من الممكن تعميم تلك النظرية لكي تشمل أيضا الظواهر غير الميكانيكية، ولاسيما تلك التي يلعب فيها المجال دورا كبيرا. وسيؤدي بنا البحث لإجابة هذا السؤال إلى مبادئ النظرية النسبية. فمن المعلوم – مثلا – أن سرعة الضوء في الفراغ أو بعبارة أخرى في الأثير تبلغ ١٨٦٠٠٠ ميلا في الثانية، وأن الضوء هو عبارة عن مجموعة من الموجات الكهرومغناطيسية تنتشر خلال الأثير. ونعلم كذلك أن المجال الكهرومغناطيسي مصحوب دائما بقدر معين من الطاقة يمكننا إدراكها بمجرد إشعاعها.

وعلى الرغم من أننا نعلم حق العلم المصاعب العديدة التي تكتنف كنه التركيب الميكانيكي للأثير؛ فإننا سنستمر مؤقتا في الاعتقاد بأن الأثير هو وسط تنتشر فيه الأمواج الكهرومغناطيسية.

لنفرض الآن أننا جلوس في حجرة زجاجية مغلقة معزولة عن العالم الخارجي فلا يمكن للهواء أن يتسرب منها أو إليها، ثم أخذنا في تبادل الأحاديث، أي أننا أخذنا في توليد وإرسال أمواج صوتية تنتشر من مصادرها (أفواهنا) بسرعة الصوت في الهواء. فإذا لم يوجد الهواء بين الفم المتحدث والأذن المنصتة، فإننا لن نسمع أبدا أي صوت. وقد

أثبتت التجارب العملية أن سرعة الصوت ثابتة في جميع الاتجاهات إذا كان الهواء ساكنا في المجموعة الإحداثية التي اخترناها.

لنفرض أن الحجرة أخذت الآن في التحرك بسرعة منتظمة خلال الفضاء، وأن هناك شاهدا خارج الغرفة يرى من خلال جدرانها الزجاجية كل ما يحدث داخلها، وأن هذا المشاهد سيحاول قياس سرعة الصوت الصادر في الغرفة المتحركة بالنسبة إلى إحداثيات مثبتة في مكان وجوده. أي أننا سنعود مرة أخرى إلى الكلام عن كيفية تعيين السرعة في إحداثيات معينة إذا كانت معروفة في مجموعة أخرى. سيدعي المشاهد الداخلي (أي داخل الغرفة) أن سرعة الصوت بالنسبة إليه ثابتة في جميع الاتجاهات في حين أن المشاهد الخارجي سيقرر أن سرعة الصوت الصادرة في الحجرة المتحركة، والتي قيست في مجموعته الإحداثية، ليست ثابتة في كل الاتجاهات، إذ أن قيمتها ستزيد عن القيمة القياسية لسرعة الصوت في اتجاه حركة الغرفة وستقل في الاتجاه المضاد.

ومن السهل الوصول إلى هذه النتائج بواسطة التحويلات الكلاسيكية (يمكننا تحقيقيها أيضا بالتجربة) إذ أن الحجرة تحمل معها الوسط المادي، أي الهواء الذي تنتشر فيه أمواج الصوت، وإذن ستختلف سرعة الصوت بالنسبة للمشاهدين الداخلي والخارجي.

ويمكننا استخلاص نتائج أخرى من نظرية الصوت باعتباره كموجات تنشر خلال وسط مادي. فمثلا يمكننا إيجاد طريقة – ليست

الوحيدة دون شك – للتهرب من سماع كلام لا نود سماعه، وذلك بأن نبتعد عن المتكلم بسرعة أكبر من سرعة الصوت بالنسبة للهواء المحيط به، وبذا لن تتمكن موجات الصوت غير المرغوب فيها من اللحاق بنا. وكذلك إذا سهي علينا التنبه لكلمة سبق أن قيلت ونود معرفتها، علينا أن نجري بسرعة أكبر من سرعة الصوت كي نتمكن من اللحاق بالموجات التي تكون الكلمة المراد سماعها. وليس في هذين المثالين ما يصعب تصديقه سوى أن علينا أن نجرى بسرعة تبلغ أربعمائة ياردة في الثانية، ولا شك أن التطور الصناعي الحديث سيجعل تحقيق ذلك في حيز الإمكان. وتنطلق الرصاصة من فوهة بندقية بسرعة أكبر من سرعة الصوت، فإذا تحرك شخص ما مع هذه الرصاصة بسرعتها فإنه لن يسمع صوت انطلاقها من البندقية على الإطلاق.

وتتميز جميع هذه الأمثلة بطابع ميكانيكي بحت، ولذا فقد يخطر ببالنا أن نضع الآن هذه الأسئلة المهمة!

أيمكننا إجراء تجارب متشابهة لتلك التي قمنا بها في حالة الأمواج الصوتية مع أمواج الضوء؟..

وهل تنطبق نظرية جاليليو النسبية والتحويل الكلاسيكي على الظواهر الضوئية والكهربائية؟

ولعله من المخاطرة أن تجيب على هذه الأسئلة ببساطة بقولنا: "نعم" أو "لا" قبل أن نتفهم هذه المسائل حق الفهم؛ ففي حالة

الموجات الصوتية الصادرة داخل الحجرة المتحركة بانتظام، بينا نتائجنا على الاعتبارات الآتية:

تحمل الحجرة معها ما بداخلها من الهواء الذي تنتشر فيه أمواج الصوت.

ترتبط السرعتان المشاهدتان في مجموعتين إحداثيتين – تتحرك كل منهما بسرعة منتظمة بالنسبة للأخرى – بقوانين التحويل الكلاسيكية. فإذا اعتبرنا الآن الأمواج الضوئية بدلا من الأمواج الصوتية فإن الحالة تتغير إذ أن الشخصين لن يتكلما بل سيتراسلان بواسطة الإشارات أو الموجات الضوئية المنتشرة في جميع الاتجاهات. فلنفرض إذن أن مصادر الضوء مثبتة في الحجرة باستمرار وأن الموجات الضوئية تنتقل في الأثير كما تنتقل أمواج الصوت في الهواء.

ولكن هل يتحرك الأثير مع الحجرة كما فعل الهواء؟ وبما أنه ليس لدينا صورة ميكانيكية عن الأثير فإنه من الصعب جدا الإجابة على مثل هذا السؤال.

إذا كانت الغرفة مغلقة فإن ما بداخلها من الهواء سيتحرك معها، ومن الواضح أنه ليس هناك أي معنى لمعاملة الأثير بالمثل، حيث أن الأثير يخترق جميع الأجسام المادية، فليست هناك حواجز تقف دونه، وفي هذه الحالة ستمثل الحجرة المتحركة مجموعة إحداثيات متحركة مثبت بها مصدر ضوئي. ومع ذلك فليس هناك ما يمنعنا من أن نتصور

أن الحجرة المتحركة والحاملة لمصدر الضوء، تحمل أيضا معها الأثير، تماما كما كانت الحجرة المغلقة تحمل معها مصدر الصوت والهواء. ولكن يمكننا أيضا تصور العكس، أي أن الحجرة تتحرك خلال الأثير تماما كما تتحرك سفينة خلال بحر عديم المقاومة للحركة، فلا تحمل معها أي جزء من الوسط بل تتحرك خلاله فقط.

ففي الحالة الأولى تحمل الحجرة الأثير مع مصدر الضوء، وبذا تصبح الحالة مشابهة تماما للحالة الصوتية، وبذلك سنحصل على نتائج مشابهة. أما في الحالة الثانية فإن الغرفة المتحركة الحاملة لمصدر الضوء لن تحمل معها الأثير، وبذلك ستنعدم المشابهة مع الحالة الصوتية، ولا يمكننا إذن تطبيق نتائج الحالة الصوتية على حالة الأمواج الضوئية، وهاتان الحالتان هما الاحتمالان النهائيان. وطبيعي أنه يمكننا الاسترسال في الخيال فنفرض وجود الحالة الصعبة التي فيها تعطي الحجرة الحاملة للمصدر حركة جزئية للأثير. ولكن ليس هناك ما يجعلنا ندرس هذه الحالات المعقدة قبل أن نبحث فيما إذا كانت التجارب العملية تؤيد إحدى الحالتين النهائيتين البسيطتين.

وسنبدأ الآن بدراسة إحدى هاتين الحالتين؛ فنفرض أن الغرفة المتحركة تحمل معها الأثير، وأن مصدر الضوء مثبت داخلها؛ فإذا كانت قاعدة التحويل لسرعات الموجات الصوتية صحيحة، فإننا يمكننا معاملة الموجات الضوئية بالمثل. وليس هناك ما يدعو إلى الشك في صحة قوانين التحويل التي تنص على أن السرعات تضاف إلى بعضها في

حالات وتطرح من بعضها في أخرى. فنفرض إذن أن الأثير بتحرك مع الحجرة وأن قوانين التحويل صحيحة؛ فإذا ضغطنا الآن مثلا زر كهربائي لإضاءة مصدر الضوء الموجود بالحجرة، فإن موجات الضوء ستتحرك بسرعة ١٨٦٠٠٠ ميلا في الثانية. وبما أن المشاهد الخارجي سيلاحظ حركة الحجرة، وبالتالي كذلك حركة المصدر، المثبت فيها والأثير – الذي يحمل موجات الضوء – والذي تدفعه الحجرة على الحركة معها، فإن استنتاجاته ستكون بأن سرعة الضوء – مقاسة في أية مجموعة إحداثية خارجية – ستختلف باختلاف اتجاه الحركة، وستكون قيمة السرعة أكبر من القيمة القياسية إذا قيست في اتجاه الحركة وأقل منها إذا قيست في الاتجاه المضاد. أي أننا في حالة الحجرة المتحركة والمثبت بها مصدر الضوء والتي تحمل معها الأثير قد توصلنا إلى النتيجة الآتية: تتوقف سرعة الضوء على سرعة المصدر نفسه، إذا فرضنا صحة قوانين التحويل؛ أي أن سرعة الضوء الذي يصلنا من مصدر متحرك تكون أكبر من السرعة القياسية إذا كانت حركة المصدر في اتجاهنا وأقل منها إذا كانت في الاتجاه المبتعد عنا.

إذا أمكن لسرعتنا أن تزيد عن سرعة الضوء فإنه يصبح في إمكاننا الهروب من إشارة ضوئية مقتربة منا. ويمكننا كذلك رؤية أحداث ماضية عند لحاقنا بالأمواج الضوئية التي سبق إرسالها من قبل. وسنرى هذه الحوادث بترتيب عكسي لنظام حدوثها إذ أننا سنلحق أولا بالموجات المرسلة حديثا ثم المرسلة قبلها وهكذا، وستظهر أمامنا سلسلة الحوادث التي وقعت على سطح الأرض كصور فيلم سينمائي بدئ في

عرضه من نهايته إلى أوله. وتنتج جميع هذه النتائج من الفرض بأن مجموعة الإحداثيات المتحركة تحمل معها الأثير وبأن قوانين التحويل الميكانيكية تتحقق دائما، أي أن التشابه بين الضوء والصوت يكون تاما في هذه الحالة.

ولكن ليس هناك ما يؤيد صحة هذه الاستنتاجات، بل إن جميع التجارب التي أجريت بقصد تحقيقها قد أتت بنتائج عكسية على خط مستقيم، وبشكل لا يحتمل الشك. هذا على الرغم من كون هذه التجارب غير مباشرة بسبب الصعوبات الفنية الجمة الناتجة من كبر قيمة سرعة الضوء، أي أن نتائج هذه التجارب كلها هي : "لسرعة الضوء نفس القيمة في جميع الإحداثيات، غير متوقعة البتة على حركة مصدر الضوء وكيفيتها".

ولن ندخل هنا في وصف تفصيلي للتجارب العديدة التي تمكننا من الوصول إلى هذه النتيجة، ولكن يمكننا ذكر بعض الاعتبارات – التي وإن لم تثبت – أن سرعة الضوء لا تتوقف على سرعة المصدر، فإنها تجعل هذه الحقيقة مستساغة ومقنعة.

تتحرك الكرة الأرضية وزميلاتها من سيارة المجموعة الشمسية في حركة دورانية حول الشمس، ولم تعرف حتى الآن أية مجموعة فلكية شبيهة بالمجموعة الشمسية، ولكن يوجد عدد كبير مما يسمى بالنجوم المزدوجة. والنجم المزدوج هو عبارة عن نجمين يتحركان حول نقطة

تسمى بمركز ثقلهما. وقد أثبتت مشاهدة حركة هذه النجوم المزدوجة صحة قانون نيوتن للجاذبية. دعنا نفرض الآن أن سرعة الضوء تتوقف على سرعة مصدره، فيستنتج من ذلك أن الإشارة أو الشعاع الضوئي القادم من النجم سيتحرك بسرعة أو ببطء حسب قيمة سرعة النجم عند لحظة إرسال الشعاع. وفي هذه الحالة تصبح الحركة (كما نشاهدها) مضطربة، ويصبح من المستحيل في حالة النجوم المزدوجة تحقيق قانون الجاذبية التي تسير بمقتضاه مجموعتنا الشمسية.

ولنعتبر تجربة أخرى مبنية على فكرة بسيطة، لنتصور عجلة تدور بسرعة كبيرة، فطبقا لافتراضنا سيتحرك الأثير مع العجلة المتحركة؛ فإذا مرت الآن موجة ضوئية قريبا من العجلة الدائرة فإن سرعتها ستتوقف على ما إذا كانت العجلة ساكنة أو متحركة، حيث أن سرعة الضوء في الأثير الساكن تختلف عن قيمتها في الأثير الذي تدفعه العجلة على الدوران معها، تماما كما تختلف سرعة الصوت عندما يكون الهواء ساكنا عن قيمتها عندما تهب رياح عاصفة.

ولكننا لم نتمكن عمليا من ملاحظة أي فرق في سرعة الضوء مع ما أعددنا من تجارب دقيقة، وكانت النتيجة باستمرار ضد الفرض بحركة الأثير، ويمكننا الآن ذكر النتائج التالية التي تؤيدها جميع الاعتبارات والأدلة العلمية.

- لا تتوقف سرعة الضوء على حركة مصدر الضوء.

• لا يصح لنا أن نفرض أن الأجسام المتحركة تحمل الأثير المحيط بها.

وإذن يجب علينا أن ننبذ جانبا فكرة التشابه بين أمواج الصوت وأمواج الضوء، وأن نبدأ بدراسة الاحتمال الثاني الذي ينص على أن المادة تتحرك خلال الأثير الذي لا يتأثر بتاتا بحركة الأجسام. أي أننا سنفرض وجود بحر من الأثير يحوي كل الإحداثيات سواء أكانت ساكنة أم متحركة بالنسبة إليه. ولنهمل الآن مؤقتا السؤال عما إذا كانت التجارب العملية قد أثبتت صحة هذا الفرض أو عدم صحته، إذ أنه من الأفضل أن نفهم معنى هذا الفرض الجديد والنتائج التي يمكننا استخلاصها منه.

وهناك مجموعة إحداثية ساكنة بالنسبة إلى هذا البحر الأثيري. ولا يمكننا – في الميكانيكا – التفرقة بين مجموعة وأخرى من بين المجموعات الإحداثية التي تتحرك بانتظام بالنسبة لبعضها، وإذن تعتبر جميع هذه المجموعات متشابهة في كل شيئ

وإذا كان لدينا مجموعتان إحداثيتان متحركتان بالنسبة لبعضها بسرعة منتظمة فإنه ليس هناك معنى في الميكانيكا للتساؤل عن أيهما المتحرك وأيهما الساكن، حيث أن السرعة النسبية هي التي يمكننا مشاهدتها فقط، ولن نستطيع التحديث على الحركة المنتظمة المطلقة بسبب قاعدة جاليليو النسبية.

ما هو معنى القول بأن للحركة المطلقة – فضلا عن الحركة النسبية – وجود ملموس؟ الجواب ببساطة هو أن هناك مجموعة إحداثية تكون فيها القوانين الطبيعية مختلفة عن مثيلاتها في المجموعات الإحداثية الأخرى، وتعنى كذلك أن المشاهد يستطيع إدراك ماذا بمثيلاتها في مجموعة الإحداثيات الوحيدة التي يمكننا اتخاذها كمجموعة قياسية. وتعتبر هذه الاعتبارات غير مألوفة في الميكانيكا الكلاسيكية حيث ليس هناك أي معنى للكلام عن الحركة المنتظمة المطلقة بمقتضى قانون جاليليو للقصور الذاتي.

"ما هي الاستنتاجات التي يمكننا الحصول عليها من ظواهر المجال، إذا فرضنا الحركة في الأثير؟ وهذا يعني أن هناك مجموعة إحداثية واحدة مميزة وثابتة للبحر الأثيري. ومن الطبيعي أنه يجب أن تأخذ بعض قوانين الطبيعة صورا مختلفة في هذه المجموعة وإلا فلا معنى للعبارة "الحركة خلال الأثير" وإذا كانت قاعدة جاليليو النسبية صحيحة فلن يكون هناك معنى للحركة خلال الأثير، إذ أن التوفيق مستحيل بين الفكرتين. فإذا وجدت مجموعة إحداثية خاصة مثبتة في الأثير فإنه يحق لنا الكلام عن الحركة أو السكون المطلقتين.

وفي الحقيقة أنه ليس من حقنا أن نختار، فقد حاولنا جاهدين إنقاذ قاعدة جاليليو النسبية بفرض أن المجموعات الإحداثية تحمل الأثير معها في حركتها، ولكن ذلك أدى إلى التعارض مع التجارب العملية، فلم

يصبح أمامنا إذن سوى أن ننبذ قاعدة جاليليو النسبية، ونعتبر الفرض القائل بأن جميع الأجسام تتحرك خلال البحر الأثيري الساكن.

وسندرس الآن بعض الاستنتاجات المعارضة لقاعدة جاليليو النسبية، والتي تؤيد فكرة الحركة خلال الأثير، وسنتخيل الآن بعض تجارب نجريها على هذه الاستنتاجات، بغض النظر عن الصعوبات العملية التي تحول دون تحقيق هذه التجارب، حيث أن ما يعنينا الآن هي النظريات وليست الصعوبات العملية.

سنعود الآن مرة ثانية إلى حجرتنا السريعة الدوران وإلى المشاهدين: الخارجي والداخلي. من الطبيعي أن يتخذ المشاهد الخارجي البحر الأثيري كمجموعة إحداثياته، وهي المجموعة المميزة التي تبلغ فيها سرعة الضوء قيمتها القياسية، وسترسل جميع المصادر الضوئية – الساكنة والمتحركة في البحر الأثيري – الضوء منتشرا بنفس السرعة القياسية. لنفرض أن الحجرة وبها المشاهد الداخلي تتحرك خلال الأثير وبأن جدرانها شفافة بحيث تمكن المشاهدين الخارجي والداخلي من قياس سرعة الضوء عند توليد إشارة ضوئية وسط الحجرة، فإذا سألنا كلا المشاهدين عن نتائج قياسهما لاقتربت إجابتاهما مما يلي:

المشاهد الخارجي: حيث أن مجموعة إحداثيات مثبتة في البحر الأثيري؛ فإن الضوء سيكون له نفس السعة القياسية، ولن يعنيني ما إذا كان مصدر الضوء متحركا أم لا، حيث أن الأثير ثابت لا يتحرك. إن

إحداثيات مميزة عن جميع الإحداثيات الأخرى ويجب أن يكون لسرعة الضوء فيها القيمة القياسية بغض النظر عن اتجاه الأشعة أو حركة المصدر.

المشاهد الداخلي: تتحرك حجرتي خلال البحر الأثيري، ولذلك فإن أحد جدران حجرتي سيبتعد عن الضوء المشع في حين يقترب منه الجدران المقابل. فإذا كانت حجرتي متحركة في الأثير بسرعة الضوء نفسه فإن الإشارة الضوئية الصادرة من مركز الحجرة لن تصل أبدا إلى الجدار المبتعد بسرعة الضوء عن الإشارات الضوئية المنبعثة. أما إذا تحركت الحجرة بسرعة أقل من سرعة الضوء فإن موجة صادرة من وسط الحجرة ستصل إلى أحد جوانبها قبل الأخرى، إذ أن الضوء سيصل إلى الجانب المقترب منه قبل أن يلحق بالجانب المتراجع أمامه من الناحية الأخرى. وإذن على الرغم من أن مصدر الضوء مثبت في مجموعة إحداثياتي فإن سرعة الضوء لن تكون لها نفس القيمة في جميع الاتجاهات أي أنها ستكون أصغر قيمة في اتجاه حركة الحجرة بالنسبة إلى البحر الأثيري لأن الجدار في هذه الحالة سيكون مبتعدا عن الضوء المنبعث، وستكون قيمتها أكبر في الاتجاه المضاد لأن الجدار سيقترب من موجات الضوء متلهفا على لقائها.

ومن ذلك نستنتج أن سرعة الضوء سيكون لها نفس القيمة في جميع الاتجاهات فقط في حالة المجموعة الإحداثية المميزة والمثبتة في البحور الإحداثية المميزة والمثبتة في البحر الأثيري، أما في باقي

المجموعات المتحركة بالنسبة إلى البحر الأثيري فإن السرعة ستتوقف على الاتجاه الذي تقاس فيه السرعة. وإجراء مثل هذه التجربة السابقة يمكننا من اختبار صحة نظرية الحركة خلال الأثير.

وقد سهلت علينا الطبيعة الأمر بأن وضعت تحت تصرفنا مجموعة متحركة بسرعة مرتفعة جدا، ونعني بذلك الكرة الأرضية في حركتها السنوية حول الشمس. فإذا كانت نظريتنا صحيحة وجب أن تكون سرعة الضوء في اتجاه حركة الأرض مختلفة عنها في الوضع العكسي. وفي إمكاننا تقدير هذا الفرق في السرعة وإعداد تجارب عملي لتقدير قيمته. ومن الطبيعي أن مثل هذه التجارب ويجب أن تكون غاية في الدقة بسبب وصغر الفترات الزمنية التي يجب علينا قياسها

وقد توافرت شروط الدقة في تجربة ميكلسون وورلي التي وضعت لقياس الاختلاف في سرعة الضوء البحر الأثيري الساكن الذي تتحرك خلاله الأجسام، إذ لم يظهر وجود أية علاقة بين سرعة الضوء واتجاه حركة المصدر. وليست سرعة الضوء هي الكمية الوحيدة التي يجب أن تتوقف على حركة المجموعة الإحداثية، على أساس نظرية البحر الأثيري الساكن، بل هناك كميات مجالية أخرى. وقد باءت بالفشل جميع التجارب التي أجريت بقصد إدراك وجود أي فرق في سرعة الضوء، ولم تصب أي نجاح على الإطلاق في إظهار ما يثبت وجود أي تأثير لحركة الكرة الأرضية على الظواهر الطبيعية.

وقد أصبحنا الآن في موقف حرج! فقد حاولنا وضع فرضين، ينص الأول على أن الجسم المتحرك يحمل الأثير معه، ولكن عدم توقف سرعة الضوء على حركة مصدره يناقض هذا الفرض، وكان الفرض الثاني يقول بوجود مجموعة إحداثية مميزة وبأن الأجسام المتحركة لا تحمل الأثير معها، بل تتحرك خلال بحر أثيري ساكن، وقد أدى هذا الفرض إلى عدم صحة قاعدة جاليليو النسبية، وبأن سرعة الضوء لا يمكن أن تكون لها نفس القيمة في كل المجموعات الإحداثية، ولكن هذا يتعارض أيضا مع التجارب العلمية.

وقد ظهرت بعد ذلك نظريات كثيرة بنيت على الاعتقاد بأن الحقيقة قد تكون في فرض ينحصر بين الفرضين السابقين، ويتلخص في أن الأثير يتحرك جزئيا فقط مع الإحداثيات المتحركة، ولكن جميع هذه الفروض باءت بالفشل! ولم تنجح كل المحاولات التي بذلت لشرح الظواهر الكهرومغناطيسية في المجموعات الإحداثية سواء أكان ذلك بفرض حركة الأثير أو بكلا الفرضين معا. وأدى ذلك كله إلى أن أصبح العلم في موقف يعتبر من أخرج المواقف التي مرت عليه في تاريخه الطويل، إذ أن جميع فروض الأثير لم تؤد إلى نتيجة ما! وكانت أحكام التجارب العملية دائما ضد جميع الافتراضات والتأويلات.

وإذا أمعنا النظر الآن فيما سبق بسطه من تطورات علم الطبيعة فإننا نرى أن الأثير – عقب ولادته فورا – قد أصبح مصدر تعب للعائلة الطبيعية؛ فقد أسبغ عليه العلماء الوصف الميكانيكي أولا، ولكن سرعان

ما نبذ. ثم رأينا بعد ذلك كيف فقدنا الأمل في نجاح الفرض بوجود بحر أثيري ساكن وتمييز مجموعة إحداثية تمكننا من تعريف الحركة المطلقة فضلا عن الحركة النسبية المعروفة، وقد كانت هذه تكفى لتبرير فرض وجود الأثير (فضلا عن وظيفته في حمل الأمواج).

وهكذا فشلت جميع المحاولات لجعل الأثير حقيقة، فلم تلمس له أية خواص ميكانيكية، ولم نستطع اكتشاف أو تعريف الحركة المطلقة. ولم يبق لدينا من جميع الصفات التي أضيفت على الأثير سوى تلك التي أخترع من أجلها، ألا وهي مقدرته على حمل وإرسال الموجات الكهرومغناطيسية. ولعل المصاعب التي لاقيناها بسبب الأثير تدفعنا إلى أن نطرده من مخيلتنا ونحرم على أنفسنا حتى مجرد ذكره. ونقول بعد ذلك أن فضاء كوننا له الخاصية الطبيعية التي تمكنه من إرسال الأمواج، وبهذه الطريقة نجنب أنفسنا استخدام الكلمة التي قررنا حذفها. ومن الطبيعي أن حذف كلمة من قاموسنا ليس علاجا، فمتاعبنا في الحقيقة تبلغ من الفداحة حدا لا تحله مثل هذه الطريقة.

ولنسجل الآن الحقائق التي أثبتت التجارب صحتها، ودون أن نحفل بعد ذلك بتاتا بمتاعب الأثير:

١ – تبلغ سرعة الضوء دائما قيمتها القياسية، ولا تتوقف على حركة مصدر الضوء أو جهاز استقباله.

٢ – تتحقق جميع القوانين الطبيعية في مجموعتين إحداثيتين متحركتين بسرعة منتظمة بالنسبة لبعضهما، ولا توجد هناك طريقتان لتمييز الحركة المنتظمة المطلقة.

وهناك تجارب كثيرة لتأييد هاتين النتيجتين، ولكن ليست هناك تجربة واحدة لنقضهما. وتعتبر النتيجة الأولى عن استمرار ثبوت سرعة الضوء، وتعم الثانية قاعدة جاليليو النسبية – التي وضعت للظواهر الميكانيكية – لكي تشمل جميع الظواهر الطبيعية.

وقد رأينا في الميكانيكا أنه إذا كانت سرعة النقطة المادية تبلغ قدرا معينا بالنسبة لمجموعة إحداثية؛ فإن قيمتها بالنسبة لمجموعة أخرى متحركة بسرعة منتظمة بالنسبة للأولى تصبح مختلفة، وهذا ناتج من قواعد التحويل الميكانيكية البسيطة. ومن السهل الاهتداء إلى هذه القواعد بالفطرة (حركة بحار بالنسبة إلى سفينة ثم بالنسبة إلى الشاطئ). وقد يخيل إلينا أن هذا القانون ليس به أي خطأ، ولكنه في الحقيقة يتعارض مع ثبوت سرعة الضوء؛ أي أننا إذا أضعفنا النتيجة التالية:

٣ – يمكن تحويل الأوضاع والسرعات من مجموعة إحداثية إلى أخرى بواسطة قانون التحويل الكلاسيكي؛ فإن التناقض يصبح واضحا، إذ أننا لا يمكننا أن نجمع بين النتائج (١)، (٢)، (٣).

ووضوح التحويل الكلاسيكي وبساطته يستبعدان أي محاولة لتغييره، حتى نستطيع القضاء على التناقض الموجود بين (١)، (٢) من

جهة أخرى. وقد سبق أن رأينا كيف عارضت التجارب العملية أي تغيير في النتيجتين (١)، (٢) حيث أن جميع النظريات المتعلقة بحركة الأثير تطلبت تغيير هذين النتيجتين. وهكذا نلمس مرة أخرى فداحة مصاعبنا وأننا في حاجة ماسة إلى دليل يهدينا إلى الطريق القويم. ويبدو أن هذا الطريق هو أن نقبل الفرضين الأساسيين (١)، (٢) وننبذ – على الرغم مما قد يبدو من غرابة ذلك – الفرض الثالث. ويبدأ هذا الطريق الجديد من تحليل المعتقدات الأولية والأساسية، وسنرى كيف يضطرنا هذا التحليل إلى تغيير آرائنا القديمة ويمكننا من التغلب على مصاعبنا.

الزمن والمسافة والنسبية:

لنضع الآن الفرضين التاليين:

١ – لسرعة الضوء في الفراغ نفس القيمة في جميع المجموعات الإحداثية المتحركة بالنسبة لبعضها بسرعة منتظمة.

٢ – القوانين الطبيعية واحدة في جميع المجموعات الإحداثية المتحركة بسرعة منتظمة بالنسبة لبعضها.

وتبدأ نظرية النسبية بهذين الفرضين، ولن نستخدم فيما يلي التحويلات الكلاسيكية لأننا نعلم مما سبق أنها تتعارض مع فرضينا. ومن الضروري هنا – كما هي الحال في العلم دائما – أن نتخلص من تحيزنا إلى نظرية بالذات. ونظرا إلى أننا رأينا أن أي تغيير في (١)، (٢) يؤدي

إلى التعارض مع التجارب العملية فإنه يجب أن تكون لدينا الشجاعة لكي نعلن صحة هذين الفرضين، ثم نركز بعد ذلك جل اهتمامنا بنقطة الضعف المحتملة، ألا وهي الطريقة التي تتحول بها الأوضاع والسرعات من مجموعة إحداثية إلى أخرى. وسنمضي الآن في استخراج بعض النتائج من (١)، (٢) ثم دراسة تعارض الفرضين السابقين مع التحويلات الكلاسيكية والبحث عن المعاني الطبيعية للنتائج التي نحصل عليها.

وسنعود الآن مرة أخرى إلى الحديث عن الحجرة المتحركة ذات المشاهدين: الخارجي، والداخلي.. وسنفرض أن إشارة ضوئية قد أرسلت من وسط الحجرة، ولنسأل الآن المشاهدين عما ينتظر أن يشاهدا على أساس الفرضين السابقين، مع غض النظر عما سبق قوله عن الوسط الذي ينتقل الضوء خلاله. وسنذكر فيما يلي إجابة المشاهدين:

المشاهد الداخلي: ستصل الإشارة الضوئية المنبعثة من وسط الحجرة إلى جدرانها في نفس اللحظة، لأنها تبعد نفس المسافة عن مصدر الضوء ولأن سرعة الضوء ثابتة في جميع الاتجاهات.

المشاهد الخارجي: ستكون سرعة الضوء في مجموعتي هي نفسها تلك التي أدركها المشاهد في المجموعة المتحركة، ولا يعنيني ما إذا كان مصدر الضوء يتحرك في مجموعة إحداثية أم لا، لأن حركته لن تؤثر في سرعة الضوء على الإطلاق. وكل ما أراه هو إشارة ضوئية متحركة بالسرعة القياسية الثابتة في جميع الاتجاهات. وأشاهد إحدى جوانب الحجرة

تحاول الابتعاد عن الإشارة الضوئية في حين أن الجانب الآخر يقترب منها، ولذا فإن الضوء سيصل إلى الجانب الأخير قبل وصول إلى الأول بلحظات صغيرة جدا إذا كانت سرعة الحجرة صغيرة القدر بالنسبة إلى سرعة الضوء.

ومقارنة استنتاجات هذين المشاهدين تثير الدهشة حقا، فإنها تتعارض صراحة مع آراء ومعتقدات علم الطبيعة الكلاسيكي التي ظن العلماء أن أسسه فوق كل شك. فنجد مثلا أن حدثين (أي شعاعين ضوئيين) متحركين بين حائطين يستغرقان وقتا واحدا بالنسبة لمشاهد مقيم في نفس المجموعة، ويستغرقان وقتين مختلفين بالنسبة لمشاهد آخر خارج الغرفة، مع العلم بأن سرعة الضوء ثابتة في الحالتين.

وقد كان لدينا في علم الطبيعة الكلاسيكي ساعة واحدة وزمن واحد للمشاهدين في جميع المجموعات الإحداثية، فقد كان للزمن – وبالتالي للقول – بأن حدثين وقعا في آن واحد، أو أن أحدهما وقع قبل الآخر أو بعده، كان لهذه العبارات معان مطلقة لا تتوقف على أية مجموعة إحداثية. فإذا وقع مثلا حدثان في وقت واحد في مجموعة إحداثية معينة فإنهما يجب أن يظلا كذلك في جميع المجموعات الإحداثية الأخرى.

وينتج من ذلك أن الفرضين السابقين (١)، (٢) أو بعبارة أخرى نظرية النسبية، تدفعنا لنبذ هذا الاعتقاد الكلاسيكي؛ فقد وصفنا حدثين

بأنهما وقعا في لحظة واحدة في مجموعة إحداثية، ورآهما مشاهد آخر في مجموعة أخرى كأنهما حدثا في وقتين مختلفين؛ فعلينا الآن أن نتفهم هذه النتيجة وندرك معنى الجملة "إذا وقع حدثين في وقت واحد في مجموعة إحداثية فيحتمل ألا يكونا كذلك في مجموعة أخرى".

ولكن ماذا نقصد بقولنا: "حدثان وقعا في وقت واحد في مجموعة إحداثية"؟ لعله يبدو أن كل إنسان يدرك بالبديهة معنى هذه العبارة، ولكن لنتوخ الدقة في التعريفات التي نقولها بعد أن لمسنا مقدار الخطر الناجم من فرط الثقة بالبديهة.

ولنجب الآن على السؤال البسيط: ما هي الساعة؟

نستطيع بفضل شعورنا الفطري الباطني بمرور الوقت، ترتيب إحساساتنا والحكم على أن حدثا ما قد وقع قبل آخر. ولكن لكي تثبت أن الفترة الزمنية بين حدثين هي عشر ثوان مثلا لا بد لنا من ساعة. وباستخدام الساعة يصبح الزمن شيئا واقعيا. ويمكننا أن تتخذ من أي ظاهرة طبيعية "ساعة" بفرض أن هذه الظاهرة تكرر نفسها بالضبط مرارا.

فإذا أخذنا الفترة الزمنية بين بدء ونهاية هذا الحدث (الظاهرة) كوحدة الزمن، فإننا نستطيع قياس فترات الزمن الاختيارية بتكرار هذه العملية الطبيعية. وجميع الساعات – من الساعة الرملية البسيطة إلى أدق الآلات – مبنية على هذا الأساس، ففي الساعة الرملية تعرف وحدة

الزمن بالفترة التي يأخذها الرمل في التدفق من جهة الزجاج العليا إلى السفلى

لنفرض أننا قلنا أن لدينا ساعتين دقيقتين تعطيان نفس الوقت، مستقرتين في مكانين بعيدين عن بعضهما. ويجب علينا أن نقبل صحة هذه العبارة بغض النظر عن مقدار الدقة التي تتوخاها في تحقيقها. ولكن دعنا نسأل أنفسنا: ما هو معناها الحقيقي؟ كيف يمكننا التأكد من أن ساعتين بعيدتين تعطيان نفس الوقت بالضبط؟ لعل التليفزيون هو إحدى الطرق التي يمكننا استخدامها لإثبات ذلك. ويجب أن نفهم أن جهاز التلفزيون سيستخدم كمثال فقط وأنه ليس أساسا لدراستنا. وأستطيع الآن أن أقف على مقربة من إحدى الساعتين وأنظر في نفس الوقت إلى صورة الساعة الأخرى في جهاز التلفزيون، وبذلك أستطيع أن أحكم عما إذا كانت الساعتان تعطيان نفس الوقت أم لا.

ولكن هذه الطريقة ليست سليمة إذ أن صورة الساعة التي ظهرت في جهاز التليفزيون قد حملتها أمواج كهرومغناطيسية متحركة بسرعة الضوء، وبذلك تكون تلك الصورة التي رأيناها قد أرسلت قبل لحظة رؤيتها بوقت قليل، هو الوقت الذي أخذته في الانتقال من مكان الساعة الأصلي إلى جهاز التليفزيون، في حين أن الساعة الثانية تعطينا الوقت الحالي بالضبط. ويمكننا التغلب على هذه الصعوبة بسهولة إذا أخذنا صورا بالتليفزيون لكل من الساعتين عند نقطة تبعد عن كل منهما بمسافة متساوية ثم نشاهد قراءتيهما عندئذ، فإذا كانت الإشارتان قد أرسلتا في

نفس الوقت فإنهما سيصلان إلى نقطة المشاهدة في نفس اللحظة أيضا. أي أننا إذا شاهدنا ساعتين دقيقتين من نقطة في منتصف المسافة بينهما فإنهما سيعطيان نفس الزمن دائما، وبذلك يصبحان ملائمين لتعيين أزمنة الأحداث التي تقع عند نقطتين بعيدتين.

وقد سبق أن استخدمنا ساعة واحدة في الميكانيكا، ولكنها لم تكن جد ملائمة، إذ أنه كان علينا أن نقوم بكل قياساتنا على مقربة من هذه الساعة الوحيدة. وإذا نظرنا إلى ساعة موضوعة على بعد كبير خلال جهاز التلفزيون مثلا فإنه يجب علينا أن نتذكر دائما أن ما نراه الآن قد حدث فعلا في وقت مضى، كما هي الحال عندما نشاهد غروب الشمس، إذ أن ما نشاهده يكون قد وقع فعلا قبل ثماني دقائق من لحظة المشاهدة. وإذن يجب علينا أن نقوم بتصحيحات لكل تقديراتنا الزمنية بمقادير تتوقف على بعدنا من الساعة.

ويتضح مما سبق أنه من غير المناسب ألا يكون لدينا سوى ساعة واحدة، والآن وقد عرفنا كيف نستطيع الحكم على أن اثنتين أو أكثر من الساعات تعطينا نفس الزمن، وتسير بنفس الطريقة، فإننا يمكننا أن نتصور أن لدينا عددا كبيرا من الساعات في إحدى المجموعات الإحداثية. وستمكننا هذه الساعات من تقدير أزمنة وقوع الأحداث التي تقع بقربها، وسنفرض أن كل هذه الساعات غير متحركة بالنسبة لهذه المجموعة الإحداثية. وبذلك تتوفر لدينا مجموعة من الساعات الدقيقة المضبوطة التي تعطينا نفس قراءة الزمن في نفس اللحظة.

وليس فيما فعلناه من وضع هذه الساعات في مجموعاتنا الإحداثية ما يستحق أن يثير دهشتنا إذ أننا الآن نستطيع أن نقرر ما إذا كان حدثان بعيدان قد وقعا في نفس الوقت أم لا بالنسبة لمجموعة إحداثية معينة، فإذا أعطت الساعتان القريبتان من هذين الحدثين، نفس القراءة عند وقوع الحدثين أمكننا أن نجزم بأنهما قد وقعا في نفس الوقت، وكذلك أيضا يصبح في مقدورنا أن نقول بأن أحد الحدثين قد وقع قبل الآخر. وكل هذا بفضل الساعات المضبوطة المثبتة في مجموعتنا الإحداثية.

ونحن فيما سبق لم نخرج عن نطاق علم الطبيعة الكلاسيكي وليس في النظام الذي وضعناه أي تناقض مع التحويلات الكلاسيكية. وقد استخدمنا الإشارات الضوئية لضبط ساعاتنا أثناء تعريفنا للأحداث الآتية. وتلعب سرعة الضوء – التي تتحرك بها هذه الإشارات – دورا أساسيا في النظرية النسبية.

وحيث أننا معنيون بدراسة حركة مجموعتين إحداثيتين متحركتين بسرعة منتظمة بالنسبة لبعضهما، فيجب علينا أن نعتبر قضيبين مثبت بكل منهما مجموعة من الساعات، وبذا يتوفر لكل من المشاهدين الموجودين بالمجموعتين المتحركتين قضيب المقياس، ومجموعة الساعات المثبتة به.

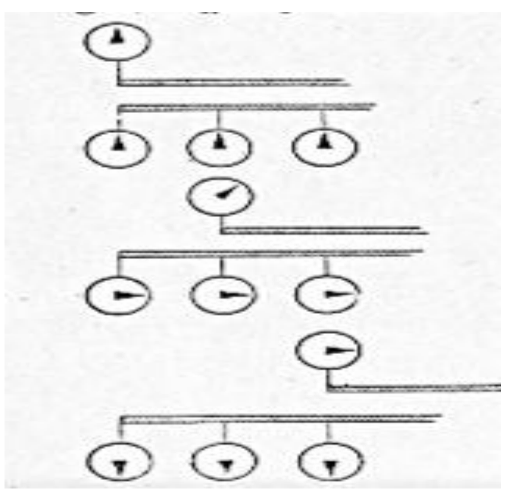
وأثناء دراستنا لعملية القياس في الميكانيكا الكلاسيكية، استخدمنا ساعة واحدة لجميع المجموعات الإحداثية، في حين أن لدينا الآن

ساعات كثيرة في كل مجموعة إحداثية، وليس هذا الفرق بذي أهمية إذ أن ساعة واحدة تكفي، ولكننا لا نستطيع الاعتراض على استخدام ساعات كثيرة ما دامت كلها مضبوطة ومتجانسة وتعطي نفس الوقت للأحداث الآتية.

ونحن الآن نقترب من النقطة الأساسية التي تتعارض فيها قوانين التحويل الكلاسيكي مع نظرية النسبية. ماذا يحدث عندما تتحرك مجموعة الساعات بانتظام بالنسبة إلى مجموعة أخرى؟.. سوف يجيب عالم الطبيعة الكلاسيكية بقوله: سوف لا يجد علينا شيئا، فستظل الساعات كما كانت ساكنة بالنسبة لبعضها، وستعطينا نفس الزمن بغض النظر عن حركتها، وتخبرنا الطبيعة الكلاسيكية بأنه إذا وجد حدثان آنيان في مجموعة إحداثية واحدة فإنهما سيظلان كذلك في أي مجموعة أخرى.

ولكن هذه ليست هي الإجابة الوحيدة، إذ يمكننا أن نتخيل للساعة المتحركة توقيتا يختلف عن توقيت الساعة الساكنة. ولندرس الآن هذا الاحتمال، دون أن نتخذ لأنفسنا قرارا فيما إذا كانت الحركة تؤثر حقا في تقدير الساعة للوقت.

ولنبدأ بشرح ماذا نعني بقولنا أن حركة الساعة تؤثر في تقديرها للوقت؟.. ولنفرض للسهولة أن لدينا ساعة واحدة مثبتة في مجموعة إحداثية عليا وأخريات مثبتة في المجموعة الإحداثية السفلى، وأن لكل



الساعات نفس التركيب الميكانيكي الداخلي وأنها مضبوطة تعطي نفس القراءة للحوادث الآنية عند ثبوت المجموعتين الإحداثيتين بالنسبة لبعضهما، وسيوضح الشكل المرافق ثلاثة أوضاع متتابعة للمجموعتين الإحداثيتين المتحركتين بالنسبة لبعضهما. وقد كان المفروض ضمنيا في الميكانيكا الكلاسيكية أن حركة الساعة لا تؤثر أبدا في نظام تقديرها للوقت. وقد كان هذا مفروضا كبديهية لا تستحق حتى مجرد الذكر. ولكن لا يجب علينا – إذا أردنا الدقة – أن نمضي في تحليل هذا الافتراض الذي سبق الأخذ به كقضية مسلمة في علم الطبيعة.

ولا يجب علينا فرض ما لمجرد أنه يختلف عما ألفناه في الطبيعة الكلاسيكية؛ فيمكننا مثلا أن نتصور أن ساعة متحركة تغير نظام توقيتها، ما دام القانون الذي يحدد هذا التغير ينطبق على جميع المجموعات الإحداثية القاصرة.

لنعتبر الآن مثلا آخر: لنفرض أن لدينا عصا يبلغ طولها باردة واحدة عندما تكون ساكنة في مجموعة إحداثية ما. لنفرض أن هذه

العصا قد أخذت في التحرك بانتظام منزلقة على القضيب الذي يمثل المجموعة الإحداثية. فهل سيظل طولها ياردة أيضا؟.. قبل الإجابة على هذا السؤال يجب علينا أن نعرف كيف يمكننا تعيين طول العصا. عندما تكون العصا في حالة سكون سينطبق طرفاها مع علامتين – على قضيب المقياس – يحصران بينهما طولا قدره ياردة واحدة في المجموعة الإحداثية (أي قضيب المقياس)، وبهذه الطريقة استنتجنا أن طول العصا يبلغ ياردة واحدة. ولكن كيف يمكننا الآن قياس طولها أثناء حركتها؟

يمكننا عمل ذلك بالطريقة التالية: عند لحظة معينة يأخذ مشاهدان صورتين فوتوغرافيتين، إحداهما لأحد طرفي العصا والأخرى للطرف الآخر، وحيث أن الصورتين قد أخذتا في نفس الوقت فإننا يمكننا مقارنة العلامات على قضيب المجموعة الإحداثية الذي ينطبق عليه طرفا العصا، وبهذه الطريقة نعين طولها. ولا بد من وجود مشاهدين ليلاحظا الأحداث التي تقع في نفس الوقت في أجزاء مختلفة من مجموعتنا الإحداثية. وليس هناك ما يحملنا على الاعتقاد بأن نتيجة مثل هذه القياسات ستتفق مع تلك التي وجدناها مثلا في حالة العصا الساكنة. وبما أن هذه الصورة الفوتوغرافية يجب أن تؤخذ في نفس الوقت، وهذا – كما نعرف الآن – يتوقف على المجموعة الإحداثية المتبعة، فإنه يبدو جد محتمل أن نتائج هذه القياسات ستختلف باختلاف المجموعات الإحداثية المتحركة بالنسبة لبعضها.

ويمكننا الآن أن نتصور بسهولة إنه ليس الساعة المتحركة وحدها هي التي تغير توقيتها، بل إن العصا المتحركة ستغير طولها أيضا، ما دامت قوانين التغير تتحقق في جميع المجموعات الإحداثية القاصرة.

وكنا ندرس حتى الآن احتمالات جديدة دون أن نعطي أي مبررات لفرضها. ولعلنا نذكر أن سرعة الضوء ثابتة في جميع المجموعات الإحداثية القاصرة، وأن من المستحيل التوفيق بين هذه الحقيقة وبين التحويلات الكلاسيكية. والآن دعنا نتساءل عما إذا كان في الإمكان أن يؤدى الفرض بالتغير في نظام توقيت الساعة المتحركة وفي طول القضيب المتحرك إلى الفرض بثبات سرعة الضوء؟ إن ذلك ممكن حقا! وهذه هي الحالة الأولى التي تختلف فيها النظرية النسبية مع الطبيعة الكلاسيكية اختلافا أساسيا. ويمكننا التعبير عن هذه الحقيقة بالطريقة العكسية التالية: إذا كانت سرعة الضوء ثابتة في جميع المجموعات الإحداثية فإن القضبان المتحركة تعاني تغيرا في أطوالها، وكذلك يتغير نظام توقيت الساعات المتحركة، ويمكننا استنتاج القوانين التي تتحكم في هذه التغيرات.

وليس في ذلك أي غموض أو عدم تمشي مع المنطق؛ فقد كان المفروض دائما في الطبيعة الكلاسيكية أن نظام التوقيت واحد للساعات المتحركة والساكنة على حد سواء، وأن للقضبان المتحركة والساكنة نفس الأطوال! فإذا كانت سرعة الضوء ثابتة في جميع المجموعات الإحداثية، أي إذا كانت نظرية النسبية صحيحة فإنه يجب علينا التضحية بهذا

الفرض. ونعلن أنه من الصعب التخلص من العقائد والآراء المتأصلة في النفس، ولكن ماذا نفعل وليس أمامنا طريق آخر؟ ومن وجهة نظر النظرية النسبية تبدو الآراء القديمة اختيارية. فلماذا نعتقد – كما فعلنا سابقا – في الزمن المطلق وثبوته بالنسبة لجميع المشاهدين في كل المجموعات الإحداثية؟ ولماذا نعتقد في ثبوت الأطوال وعدم قابليتها للتغير؟ فالزمن يتعين باستخدام الساعات والأطوال بالقضبان، ويمكن أن تتوقف نتائج قياساتها على خواص الساعات والقضبان أثناء حركتها، وليس هناك ما يبرر الاعتقاد بأن هذه النتائج والعمليات ستسير على النمط الذي نوده! وقد أرتنا المشاهدات – بطريق غير مباشر – خلال ظواهر المجال الكهرومغناطيسي أن الساعة المتحركة تغير معدل توقيتها، وأن القضيب يغير طوله، على حين أننا لم نتوقع حدوث ذلك على أساس الظواهر الميكانيكية. ويجب أن نقبل فكرة الزمن النسبي في كل مجموعة إحداثية لأنها أفضل طريقة للتخلص من متاعبنا. وقد أظهر التقدم العلمي الناتج من نظرية النسبية، أننا لا يجب أن ننظر إلى هذا التطور الجديد في المعتقدات كضرورة لا بد منها حيث أن مميزات النظرية العديدة قد أصبحت ظاهرة للعيان.

وكنا نحاول فيما سبق إيضاح الدوافع التي أدت إلى الفروض الأساسية لنظرية النسبية، وكيف أن النظرية قد اضطرتنا إلى مراجعة وتغيير التحولات الكلاسيكية باعتبار الزمن والمكان على أسس جديدة. ولسنا نهدف إلا إلى إيضاح الآراء التي تكون أسس وجهة نظر طبيعة وفلسفة جديدة. وهذه الآراء بسيطة، ولكنها – على الصورة التي صيغت فيها هنا

– لا تكفي لكي نحصل منها على استنتاجات نوعية أو كمية. وهنا يجب علينا أن نستخدم الطريقة القديمة لشرح الآراء الأساسية فقط مكتفين بذكر بعض الآراء الأخرى دون أي برهنة.

ولإيضاح الفرق بين وجهة نظر عالم الطبيعة الكلاسيكية الذي سنرمز إليه بالرمز "ق"، وهو الذي يعتقد بصحة قوانين التحويل الكلاسيكي، وبين وجهة نظر عالم الطبيعة الحديثة الذي سنرمز بالرمز "ح" وهو الذي يعتقد في نظرية النسبية وسنتصور الحديث التالي بينهما:

ق – أنا أؤمن بقاعدة جاليليو النسبية لأنني أعلم أن قوانين الميكانيكا تتحقق في مجموعتين إحداثيتين متحركتين بانتظام بالنسبة لبعضهما أو بعبارة أخرى إن هذه القوانين تعتبر لازمة بالنسبة للتحويل الكلاسيكي.

ح – ولكن نظرية النسبية يجب أن تنطبق على جميع الأحداث في عالمنا الخارجي، إذ أن جميع القوانين الطبيعية – وليست فقط قوانين الميكانيكا – يجب أن تتحقق في جميع المجموعات الإحداثية المتحركة بسرعة منتظمة بالنسبة لبعضها البعض.

ق – ولكن كيف يمكن أن تتحقق جميع القوانين الطبيعية في جميع الإحداثيات المتحركة بالنسبة لبعضها؟ فمعادلات المجال – أي معادلات ماكسويل – ليست لازمة (أي لا تتغير) بالنسبة للتحويلات الكلاسيكية، ويظهر هذا بوضوح مع سرعة الضوء، إذ أن التحويلات

الكلاسيكية تنص على أنها يجب ألا تكون ثابتة في كلا المجموعتين المتحركتين بالنسبة لبعضهما.

ح – إن هذا يثبت أن التحويلات الكلاسيكية لا يمكن استخدامها، وأن العلاقة بين المجموعتين الإحداثيتين يجب أن تكون مختلفة، وأنه يحتمل ألا نربط بين الإحداثيات والسرعات بنفس الطريقة المتبعة في التحويلات الكلاسيكية التي يجب أن نستبدل بها أخرى جديدة، تستنتج من الفروض الأساسية لنظرية النسبة.

ولنفرض أننا لا نهتم الآن بالقيم الرياضية لهذه التحويلات الجديدة، وأننا نقنع فقط بكونها مختلفة عن التحويلات الكلاسيكية، وسنسمي هذه التحويلات الرياضية الجديدة بتحويلات لورنتز. ويمكننا إثبات أن معادلات ماكسويل – أي قوانين المجال – لازمة لا تتغير بالنسبة لتحويلات لورنتز، تماما كلزوم قوانين الميكانيكا بالنسبة للتحويلات الكلاسيكية. ولنذكر كيف كانت هذه التحويلات في الطبيعة الكلاسيكية، فقد كانت لدينا قوانين تحويل للإحداثيات والسرعات، وكانت قوانين الميكانيكا لازمة بالنسبة إلى مجموعتين من الإحداثيات متحركة بانتظام بالنسبة لبعضها. وكانت لدينا تحويلات لأوضاع الأجسام فقط – دون ذكر للزمن – حيث إن الزمن كان واحدا في جميع المجموعات الإحداثية. أما في النظرية النسبية فالوضع جد مختلف فلدينا قوانين تحويل مختلفة عن القوانين الكلاسيكية وخاصة بالأوضاع والزمن والسرعة. ولكننا نكرر أن قوانين الطبيعة يجب أن تتحقق في

جميع المجموعات الإحداثية المتحركة بانتظام بالنسبة لبعضها أي أن هذه القوانين يجب أن تكون لازمة – لا بالنسبة إلى التحويلات الكلاسيكية – بل بالنسبة لنوع جديد من التحويلات يسمى بتحويلات لورنتز. وتتحقق جميع القوانين الطبيعية في جميع المجموعات الإحداثية القاصرة، وتتحول جميع القوانين الطبيعية في جميع المجموعات الإحداثية القاصرة، وتتحول هذه القوانين من مجموعة إلى أخرى بواسطة تحويلات لورنتز.

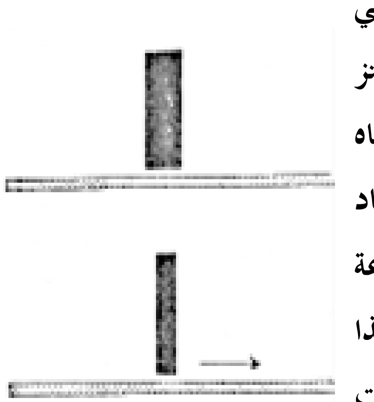
ق – أوافقك على ذلك ولكن يهمني أن أدرك الفرق بين التحويلات الكلاسيكية وتحويلات لورنتز.

ح – أفضل طريقة للإجابة على سؤالك هي الآتية: اذكر لي أولا بعضا من الخواص المميزة للتحويلات الكلاسيكية وسأحاول أن أبين لك ما إذا كانت هذه ستظل صحيحة في حالة تحويلات لورنتز أم لا، وفي الحالة الأخيرة سأشرح لك كيف تغيرت.

ق – إذا وقع حدث معين عند لحظة معلومة في مجموعتي الإحداثية فإنه ينتج أن المشاهد في مجموعة إحداثية أخرى متحركة بانتظام بالنسبة لمجموعتي سيحدد رقما مختلفا للمكان الذي يقع فيه الحدث ولكن في نفس الوقت بالطبع، إذ أننا نستخدم نفس الساعة في جميع مجموعاتنا الإحداثية، ولا يهمنا ما إذا كانت الساعة متحركة – متنقلة – أم لا. فهل هذا صحيح بالنسبة إليك؟

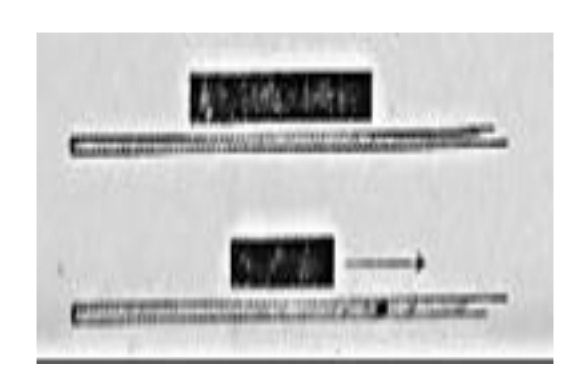
ح – كلا – هذا ليس بصحيح، فكل مجموعة إحداثية يجب أن تزود بساعاتها غير المتحركة، حيث أن الحركة تغير نظام التوقيت. فمشاهدان مثلا في مجموعتين إحداثيتين مختلفتين سيحددان أرقاما مختلفة لمكان حدث ما وكذلك رقمين مختلفين للزمن الذي يقع فيه ذلك الحدث.

ق – هذا يعنى أن الزمن ليس لازما؛ ففي التحويلات الكلاسيكية كان الزمن واحدا في جميع المجموعات الإحداثية، أما في تحويلات لورنتز فإنه يتغير ويسلك مسلك الإحداثي في التحويلات القديمة. ولا أدري ماذا يحدث للمسافة.. ففي الميكانيكا الكلاسيكية يحتفظ قضيب مادي متماسك بطوله في حالتي الحركة والسكون. فهل هذا صحيح الآن أيضا؟



ح – كلا – ليس بصحيح وفي الحقيقة أنه ينتج من تحويلات لورنتز أن العصا المتحركة تتقلص في اتجاه الحركة، ويزداد التقلص بازدياد السرعة، فكلما تحركت العصا بسرعة كلما ظهرت أكثر قصرا، ولكن هذا يحدث فقط في اتجاه الحركة. فأنت

ترى في الرسم قضيبا متحركا يتقلص إلى نصف طوله عندما يتحرك بسرعة تقترب من ٩٠ ٪ من سرعة الضوء. هذا فى حين أنه ليس هناك تقلص في الاتجاه العمودي على الحركة كما حاولت أن أبين في الرسم..



ق – هذا يعني أن تقدير ساعة متحركة للوقت وكذلك طول عصا متحركة، يتوقفان على السرعة، فكيف يمكن ذلك؟

ح – يكون هذا التغير واضحا عندما تزداد السرعة وينتج من تحويلات لورنتز أن العصا تتقلص وينعدم طولها إذا بلغت سرعتها سرعة الضوء. وبالمثل فإن تقدير ساعة متحركة للزمن يقل إذا قورنت بالساعات التي تمر عليها والمثبتة بالقضيب، وتقف نهائيا عن الدوران إذا تحركت بسرعة الضوء.

ق – يبدو لى أن هذا يتعارض مع التجربة، فنحن نعلم أن السيارة لا تتقلص عندما تتحرك، ونعلم أيضا أن السائق يمكن أن يقارن ساعته بالساعات التي يمر بها. وقد وجدت أنها كلها تتفق مع بعضها خلافا لما ذكرته لي!

ح – ما قلته صحيح لا ريب فيه. ولكنك تلاحظ أن هذه السرعات الميكانيكية صغيرة جدا بالنسبة لسرعة الضوء، وبذا يصبح من التفاهة تطبيق نظرية النسبية على هذه الظواهر. ويمكن لكل سائق أن يستخدم الطبيعة الكلاسيكية باطمئنان حتى ولو ضاعف سرعته مائة ألف مرة. ويمكننا أن نتوقع الاختلاف بين التجربة وبين التحويلات الكلاسيكية فقط عندما تقترب السرعة من سرعة الضوء؛ ففي حالة السرعات الكبيرة جدا يمكننا اختبار صحة تحويلات لورنتز.

ق – ولكن مع ذلك هناك صعوبة أخرى، فتبعا لقواعد الميكانيكا يمكنني تصور أجسام متحركة بسرعة أكبر من سرعة الضوء؛ فالجسم الذي يتحرك بسرعة الضوء بالنسبة لسفينة متحركة، ستكون سرعته أكبر من سرعة الضوء بالنسبة إلى الشاطئ. فماذا يحدث إذن للعصا التي تقلصت إلى لا شئ عندما تحركت بسرعة الضوء؟.. فمن الصعب تصور طولا سالبا، إذا ازدادت سرعة العصا عن سرعة الضوء.

ح – ليس هناك ما يدعو إلى مثل هذه السخرية! فعلى أساس نظرية النسبية لا يمكن أن تزيد سرعة الجسم عن سرعة الضوء؛ فسرعة الضوء هي الجهد الأقصى لسرعات جميع الأجسام المادية؛ فإذا كانت سرعة جسم بالنسبة للسفينة هي سرعة الضوء فإنها ستكون لها نفس القيمة بالنسبة للشاطئ؛ فقانون الجمع والطرح الميكانيكي البسيط لا يتحقق هنا أو على الأصح ينطبق بالتقريب على حالة السرعات البسيطة، ولكن ليس على السرعات التي تقترب من سرعة الضوء. وتظهر القيمة

العددية لسرعة الضوء بوضوح في تحويلات لورنتز، وتلعب دور حالة نهائية، كالدور الذي تحتله السرعة اللا نهائية في الميكانيكا الكلاسيكية. ولا تتعارض هذه النظرية العامة مع التحويلات الكلاسيكية والميكانيكا الكلاسيكية، بل أنها على العكس تتفق مع المعتقدات الكلاسيكية في الحالة النهائية عندما تكون السرعات ذات قيم صغيرة. ويتضح لنا من وجهة نظر النظرية الجديدة: متى تتحقق النظرية الكلاسيكية وأين يتضح قصورها؟. وإذن يكون تطبيق نظرية النسبية على حركة السيارات والقطارات مما يدعو حقا إلى السخرية. تماما كاستعمال الآلة الحاسبة في عمليات ضرب بسيطة موجودة في جدول الضرب.

نظرية النسبية والميكانيكا:

إن الضرورة هي التي أدت إلى نشوء نظرية النسبية، فضلا عن التناقض الواضح الكامن في النظرية القديمة، والذي لم نستطع التخلص منه بكل الطرق الممكنة. وتعزى قوة النظرية الجديدة إلى البساطة والدقة التي حلت بهما هذه المشاكل مع استخدام فروض منطقية قليلة؛ فعلى الرغم من أن النظرية نشأت من مشكلة المجال فإن عليها أن تشمل أيضا جميع القوانين الطبيعية. وهنا تبدو لنا مشكلة جديدة، فلقوانين المجال من ناحية وللقوانين الميكانيكية من ناحية أخرى طبيعتان مختلفتان، فمعادلات المجال الكهرومغناطيسي لا تتغير بالنسبة إلى تحويلات لورنتز في حين أن المعادلات الميكانيكية لا تتغير بالنسبة إلى التحويلات الكلاسيكية.

ولكن النظرية النسبية تدعي أن قوانين الطبيعة يجب أن تكون لازمة بالنسبة لتحويلات لورنتز، وليست بالنسبة للتحويلات الكلاسيكية، وليست هذه الأخيرة سوى حالة خاصة من تحويلات لورنتز عندما تكون السرعات النسبية للمجموعتين الإحداثيتين صغيرة جدا. فإذا كانت الحال كذلك فإن الميكانيكا الكلاسيكية يجب أن تتغير حتى تلائم شروط عدم التغير بالنسبة لتحويلات لورنتز. أو بعبارة أخرى أن الميكانيكا الكلاسيكية لا يمكن أن تظل حقيقة إذا اقتربت سرعة التحرك من سرعة الضوء؛ أي أنه لن تكون هناك سوى تحويلات واحدة من مجموعة إحداثية إلى أخرى، هي تحويلات لورنتز.

وقد كان من السهل تغيير الميكانيكا الكلاسيكية بطريقة لا تتعارض مع النظرية النسبية من ناحية، ولا مع مجموعة الحقائق التي حصلنا عليها بالتجربة، وشرحت على أساس الميكانيكا الكلاسيكية؛ فالميكانيكا القديمة تتحقق في حالة السرعات الصغيرة، وبذلك تكون هي الصورة النهائية للميكانيكا الجديدة.

ولعله من المفيد أن نذكر مثلا التغير في الميكانيكا الكلاسيكية الحادث بسبب النظرية النسبية، ونحاول الحصول على بعض استنتاجات منها، ثم نبحث فيها إذا كانت التجارب العملية تؤيد هذه الاستنتاجات أو تنكرها.

لنفرض أن لدينا جسما ذا كتلة معينة يتحرك على خط مستقيم وتؤثر عليه قوة خارجية في اتجاه الحركة، فكما نعلم ستتناسب القوة المؤثرة عليه مع معدل التغير في السعة وإذن لا يعنينا ما إذا زادت سرعة الجسم في الثانية من ١٠٠ إلى ١٠١ قدما في الثانية أو من ١٠٠ ميل إلى ١٠٠ ميلا وقدم واحدا في الثانية أو من ١٨٠٠٠٠ ميلا إلى ١٨٠٠٠٠ ميلا وقدما واحدا في الثانية، فالقوة التي تؤثر على جسم معين لا تتوقف إلا على معدل التغير في السرعة فقط.

فهل تتحقق هذه الظاهرة أيضا في النظرية النسبية؟ كلا.. فهذا القانون لا ينطبق إلا على حالات السرعات الصغيرة فقط. ولكن ما هو القانون الذي وضعته نظرية النسبية في حالة السرعات الكبيرة التي تقترب من سرعة الضوء؟. إذا كانت السرعة كبيرة فلا بد من وجود قوة كبيرة لزيادة مقدارها؛ فليست القوة التي تسبب زيادة قدم الثانية للسرعة ١٠٠ قدما في الثانية هي نفسها التي تسبب نفس الزيادة في سرعة تقترب من سرعة الضوء؛ فكلما اقتربت السرعة من سرعة الضوء كلما أصبح من الصعب زيادة قدرها. وعندما تتساوى سرعة الجسم مع سرعة الضوء يصبح من المستحيل زيادتها عن ذلك. وإذن فالتغيرات التي أحدثتها نظرية النسبية ليست من الغرابة في شيئ، فسرعة الضوء هي كما قلنا الحد الأقصى لجميع السرعات، وليست هناك أي قوة معينة – مهما زاد قدرها – يمكن أن تسبب أي ازدياد في السرعة عن هذا القدر. وهكذا، بدلا من القانون الميكانيكي القديم الذي يربط القوة بالتغير في السرعة نحصل على قانون أكثر تعقيدا. ويخيل إلينا – من جهة نظرنا الخاصة –

أن الميكانيكا الكلاسيكية بسيطة لأننا في جميع ملاحظاتنا وتطبيقاتنا نستخدم سرعا أقل بكثير من سرعة الضوء.

ويتميز الجسم الساكن بكتلة معينة تسمى بالكتلة الساكنة. وتفيدنا الميكانيكا بأن كل جسم يقاوم التغير في حركته، فكلما زادت الكتلة ازدادت معها المقاومة، وكلما قلت الكتلة قلت معها المقاومة. ولكن الوضع جد مختلف في النظرية النسبية فالجسم لا تزداد مقاومته للتغير كلما ازدادت كتلته فقط بل كلما ازدادت سرعته أيضا، فالأجسام ذات السرعات المقتربة من سرعة الضوء نبذل مقاومة كبيرة جدا في وجه القوى الخارجية. وقد كانت مقاومة جسم معين للتغيير في الميكانيكا الكلاسيكية شيئا ثابتا يتوقف على الكتلة وحدها، أما في نظرية النسبية فهي تتوقف على كل من الكتلة والسرعة. وتبلغ القوة حدا لا نهائيا من الكبر إذا اقتربت سرعة الجسم من سرعة الضوء.

ولدينا في الطبيعة قذائف تتحرك بمثل هذه السرعات، فذرات المواد الإشعاعية كالراديو مثلا تمثل دور المدفعية التي تقوم بإرسال قذائف بسرعات متناهية في الكبر. سنذكر الآن باختصار أحد الآراء الحديثة في علمي الطبيعة والكيمياء: تتكون جميع المواد الموجودة في الكون من بضعة أنواع من الجسيمات الأولية. وهذا يشبه إلى حد كبير ما نعرفه من أن جميع المباني في مدينة ما – بما فيها من أكواخ وناطحات سحاب ذات حجوم مختلفة وأشكال متباينة – مكونة من أنواع قليلة مختلفة من اللبنات. وإذن تتكون جميع عناصر عالمنا المادي – التي

تتراوح بين الأيدروجين وهو أخفها وزنا واليورانيوم وهو أثقلها – من نفس النوع من اللبنات أي نفس الأنواع من الجسيمات الأولية. وأثقل هذه العناصر وزنا – أي تلك المعقدة التركيب – ليست مستقرة بل دائما في حالة تفكك وهو ما نعبر عنه بقولنا أن لها نشاطا إشعاعيا. وبعض هذه اللبنات أو الجسيمات الأولية التي تبنى منها هذه الذرات ذات النشاط الإشعاعي، تنقذف أحيانا خارج الذات بسرعات كبيرة جدا تقترب من سرعة الضوء. والرأي السائد الآن المدعم بالتجارب هو أن ذرة عنصر مشع كالراديو مثلا تتميز بتركيب معقد، وأن تركيب الذات من لبنات أكثر بساطة، أي من الجسيمات الأولية.

ويمكننا دراسة كيفية مقاومة هذه الجسيمات المنبعثة بسرعات كبيرة لتأثير القوة الخارجية بواسطة تجارب دقيقة ومعقدة. وقد أظهرت التجارب أن المقاومة الناتجة من هذه الجسيمات تتوقف على سرعتها بالطريقة التي تنبأت بها نظرية النسبية. وفي حالات كثيرة مختلفة، عندما أمكن تعيين مدى توقف المقاومة على السرعة وجدنا اتفاقا تاما بين النظرية والتجربة. وها نحن الآن نرى مرة أخرى الظواهر الأساسية للأعمال المنتجة في العلم أي: التنبؤ نظريا ببعض حقائق ثم تحقيقها بالتجربة.

وتؤدي هذه النتيجة إلى تعميم ذي أهمية كبيرة؛ فللجسم الساكن كتلة معينة ولكن ليست له طاقة حركة، أي طاقة ناتجة عن حركته. أما الجسم المتحرك فله كتلة ليست له طاقة حركة، أي طاقة ناتجة عن

حركته. أما الجسم المتحرك فله كتلة وطاقة حركة، ولذا فهو يقاوم التغير في السرعة بقوة أكثر من الجسم الساكن، ومن ذلك يظهر لنا أن طاقة حركة جسم متحرك تزيد في مقاومته فإذا كان لدينا جسمان متساويان في الكتلة وكان لأحدهما طاقة حركة أكبر من الآخر، فإنه يقاوم فعل القوة الخارجية بقوة أكبر.

لنتخيل الآن صندوقا ساكنا به عدد من الكرات الساكنة أيضا بالنسبة لمجموعتنا الإحداثية. إذا أردنا تحريك الصندوق وما به، أو بعبارة أخرى زيادة سرعتها، فسنحتاج إلى قوة معينة لإحداث ذلك. ولكن هل يمكن لنفس تلك القوة أن تزيد السرعة بنفس القدر في نفس الزمن إذا كانت الكرات متحركة في جميع الاتجاهات داخل الصندوق – كما تفعل جزيئات غاز ما – بسرعة تقترب من سرعة الضوء؟.. لا بد من وجود قوة أكبر قدرا في هذه الحالة بسبب ازدياد طاقة حركة الكرات التي تزيد بدورها في قوة مقاومة الصندوق؛ فطاقة الحركة تقاوم التحرك تماما كما تفعل الكتلة. هل هذا صحيح أيضا بالنسبة لأنواع الطاقة الأخرى؟

تعطينا الفروض الأساسية لنظرية النسبية إجابة واضحة حاسمة ذات طابع كمى، وهي: تقاوم جميع الأنواع المختلفة للطاقة التغير في الحركة، وتتميز الطاقة بخواص مماثلة تماما لخواص المادة، فكتلة من الحديد يزداد وزنها إذا ما أحميت لدرجة الاحمرار، وكذلك تحمل الإشعاعات المنبعثة من الشمس، والتي تعبر الفضاء، طاقة كبيرة وبالتالي كذلك،

وإذن ينتج أن كتلة الشمس وجميع الكواكب تقل باستمرار، وتعتبر هذه النتيجة ذات الطابع العام نصرا كبيرا لنظرية النسبية، وتتفق مع النتائج العملية الأخرى التي تؤيد النظرية النسبية.

وقد عرفت الطبيعة الكلاسيكية شيئين متميزين: المادة والطاقة، فالمادة لها وزن والطاقة لها وزن، وقد ساقت لنا الطبيعة الكلاسيكية أيضا قانوني بقاء، أحدهما للمادة والآخر للطاقة. وقد سبق أن تساءلنا عما إذا كانت الطبيعة الحديثة ما تزال تعتقد في الوجود المنفصل لهذين الشيئين ولقانوني بقائهما. والجواب بالسلب، إذ أن النظرية النسبية تنص على عدم التفرقة بين الكتلة والطاقة، فللطاقة كتلة وللكتلة طاقة. وسيصبح لدينا بدلا من قانوني البقاء، قانون واحد لبقاء الكتلة (المادة) والطاقة معا على حد سواء. وقد نجحت وجهة النظر هذه نجاحا كبيرا في تطور علم الطبيعة.

ولكن كيف ظلت حقيقة وجود كتلة للطاقة وطاقة للكتلة مختفية زمنا طويلا!؟ وهل تزداد كتلة قطعة من الحديد فعلا بعد إحمائها؟.. الإجابة على هذا السؤال هي الآن بالإيجاب، وقد كانت بالسلب (صفحة ٣٠). ونستطيع التأكيد بأن عدد الصفحات بين هاتين الإجابتين لا تكفي لشرح هذا التناقض.

والموضوع الذي نحن بصدده الآن هو من النوع الذي رأيناه قبلا، فتغير الكتلة الناتج من النظرية النسبية صغير لا يمكن قياسه بطريقة الوزن

المباشر ولو باستخدام أدق الموازين. ويمكننا أن نثبت بطرق حاسمة ولكنها غير مباشرة على أن الطاقة لها وزن مثل المادة تماما.

ويرجع سبب عدم ظهور هذه الحقائق واضحة للعيان في أول الأمر، إلى ضآلة معدل التحويل بين المادة والطاقة، فيمكننا تشبيه نسبة الطاقة إلى الكتلة بنسبة عملة بخثة القيمة إلى عملة ذات سعر مرتفع. ويوضح لنا المثال التالي: الحرارة اللازمة لتحويل ثلاثين ألف طنا من الماء إلى بخار تزن حوالي جرام واحد!!! ولهذا السبب ظل الاعتقاد "بأن الطاقة لا وزن لها" زمنا طويلا، لضآلة قدر كتلتها. وبذلك يكون الوجود المستقل لكل من الطاقة والمادة ضحية ثانية لنظرية النسبية، وقد كانت الأولى هي الوسط الذي تنتشر فيه أمواج الضوء.

وقد تعدى تأثير النظرية النسبية المشكلة التي كانت سببا مباشرا لظهورها؛ فهي تزيل مشاكل ومتناقضات نظرية المجال، وتضع قوانين ميكانيكية أكثر تعميما، وتدمج قانونين مختلفين للبقاء في قانون واحد ثم تغير بعد ذلك فكرتنا الكلاسيكية عن الزمن. وليس تأثير النظرية النسبية محصورا في ناحية واحدة من علم الطبيعة بل إنه يشمل جميع الظواهر الطبيعية.

متصل الزمان والمكان:

"بدأت الثورة الفرنسية في باريس في اليوم الرابع عشر من يوليو سنة ١٧٨٩" في هذه العبارة ذكرنا مكان وزمن وقوع حدث معين؛ فإذا

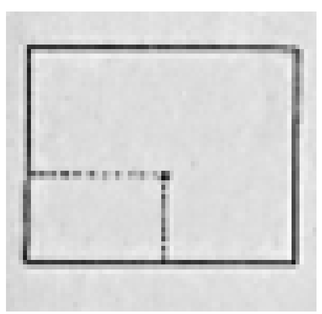
سمع هذه العبارة شخص لأول مرة، وكان لا يعرف ما هي باريس، فإنه يمكننا إخباره أن باريس هي مدينة على سطح الأرض تقع على خط طول ٣ْ شرقا وخط عرض ٤٩ْ شمالا. أي أن هذين الرقمين يميزان المكان، في حين أن "الرابع عشر من يوليو سنة ١٧٨٩" يحدد الزمن الذي وقعت فيه الحادثة، ويهمنا في علم الطبيعة تحديد مكان وزمن حدث ما على وجه الدقة، أكثر من أهميتها في التاريخ، لأن هذه الأرقام المحددة أساس للوصف الكمي.

وقد درسنا فيما مضى – بقصد السهولة – الحركة في خط مستقيم، فكانت مجموعتنا الإحداثية قضيبا متماسكا له نقطة أصل وليست له نهاية؛ فلتذكر هذا جيدا ولنعتبر نقطا مختلفة على القضيب، يمكن تعيين أماكنها بأرقام وحيدة هي إحداثيات تلك النقط. فإذا قلنا أن إحداثي نقطة ما هو ٧.٥٨٦ قدما فإننا نقصد أن بعدها عن مركز القضيب هو ٧.٥٨٦ قدما. وعلى العكس إذا أعطاني شخص ما أي عدد، ووحدة معينة فإنه يمكنني دائما إيجاد نقطة على القضيب تناسب هذا الرقم. ويمكننا أن نقول إن كل نقطة معينة على القضيب تشير إلى رقم خاص، وأن أي عدد معين يشير إلى نقطة معينة على القضيب تشير إلى رقم خاص، وأن أي عدد معين يشير إلى نقطة خاصة على القضيب، ويعبر الرياضيون عن هذه الحقيقة بالعبارة التالية: تكون جميع نقاط القضيب متصلا ذا بعد واحد. ويوجد بقرب كل نقطة معينة نقطا أخرى اختيارية. ويمكننا أن نصل نقطة على القضيب بأخرى عليه بواسطة

خطوات يمكننا تصغيرها كما نهوى. وهذه الحرية في اختبار صغر الخطوات التي تصل بين نقطتين بعيدتين تميز المتصل الذي ندرسه.

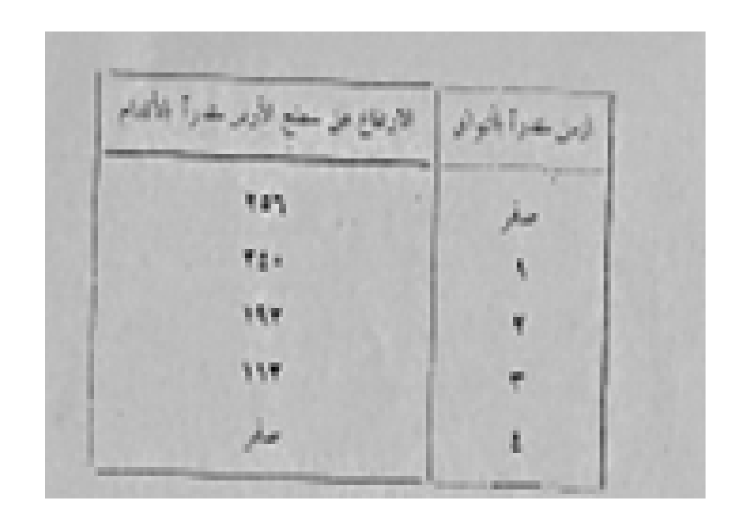
لنعتبر الآن مثلا آخر: لتفرض أن لدينا مستو معينا أو سطح مائدة مستطيلة، إذا فضلنا الأمثلة المادية. يمكننا تعيين موضع نقطة ما على هذه المائدة بواسطة رقمين لا رقم واحد، كما كانت الحال في المثال السابق، وهذان الرقمان هما بعدا هذه النقطة عن حافتين متعامدتين من سطح المائدة. وإذن رقمان – لا رقم واحد – هما اللذان يحددان مكان نقطة ما على المستوى، وكذلك تشير كل نقطة من نقط المائدة إلى رقمين عددين. أو بعبارة أخرى المستوى هو متصل ذو بعدين. ويمكن لنقطتين بعيدتين في هذا أن المستوى أن ترتبطا بمنحن يمكن تقسيمه بل خطوات نصغرها كيفما نشاء. وإذن يكون التحكم في صغر الخطوات التي تصل بين النقطتين البعيدين، اللتين يمثل كل منهما رقمان، من مميزات المتصل ذي البعدين.

ولنعتبر مثلا آخر: لنفرض أننا أردنا الآن اختبار حجرة ما كمجموعة إحداثياتنا، أي أننا نريد أن نصف الأمكنة بالنسبة لجدران الحجرة الصلبة. فموضوع نهاية المصباح الكهربائي مثلا – إذا كان ساكنا – يمكن وصفه بثلاثة أرقام معينة: يعين اثنان منها البعدين عن جدارين متعامدين بينما يحدد الثالث



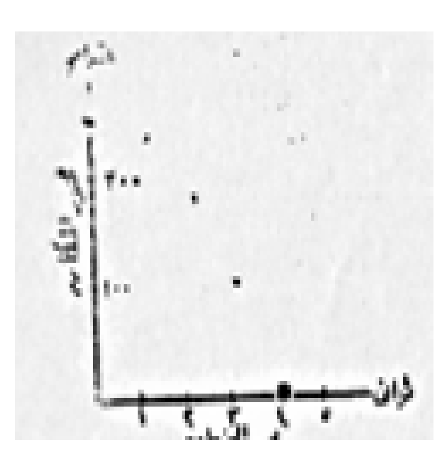
البعد عن الأرض أو السقف. وإذن تحدد ثلاثة أرقام معينة كل نقطة من نقط الفراغ، وكذلك تتميز كل نقطة من نقط الفراغ بثلاثة أرقام محددة لها. ونعبر عن هذا بقولنا إن فضاءنا هو متصل ذو ثلاثة أبعاد، وبالمثل يكون التحكم في صغر الخطوات التي يمكننا بواسطتها الربط بين نقطتين بعيدتين في الفراغ – كل منهما محددة بثلاثة أرقام – من مميزات المتصل ذي الثلاثة الأبعاد.

ولكن هذا كله ليس من علم الطبيعة في كل شيئ، ولكي نعود إلى دراستنا الطبيعية يجب أن نعتبر حركة الجسيمات المادية. ولكي ندرس ونتنبأ بوقوع أحداث في الطبيعة يجب أن تعتبر أزمنة هذه الأحداث فضلا عن أمكنة وقوعها. وسنسوق الآن إلى القارئ مثلا آخر غاية في البساطة: ارتفاعه ٢٥٦ قدما؛ فمنذ عصر جاليليو أصبح في إمكاننا أن نعين عند أي لحظة ما إحداثي (أي بعد) الحجر بعد إسقاطه من قمة البرج. وهناك جدول يبين أوضاع الحجر بعد ٠ ، ١ ، ٢ ، ٣ ، ٤ ثوان على التوالي:



الزمن مقدراً بالثواني	الارتفاع عن سطح الأرض مقدراً بالأقدام
صفر	٢٥٦
١	٢٤٠
٢	١٩٢
٣	١١٢
٤	صفر

نرى في هذا الجدول خمسة إحداثيات، يتحدد كل منها بواسطة رقمين، أي الإحداثيين الزمني والمكاني لكل حدث. فالحدث الأول هو إسقاط الحجر من ارتفاع **٢٥٦** قدما فوق سطح الأرض عند الزمن "صفر" ثانية. والحدث الثاني هو انطباق الحجر مع مقياسنا المتماسك (البرج) عند ارتفاع **٢٤٠** قدما فوق سطح الأرض. وقد حدث ذلك بعد الثانية الأولى، والحدث الأخير هو انطباق الحجر على سطح الأرض.



ويمكننا تمثيل المعلومات المذكورة في هذا الجدول الزمني بطريقة أخرى، فتمثل الأزواج الخمسة من الأرقام المذكورة في الجدول، كخمس نقاط على سطح. ولنتفق أولا على مقاييس لاتباعها في تمثيل المسافة والزمن،

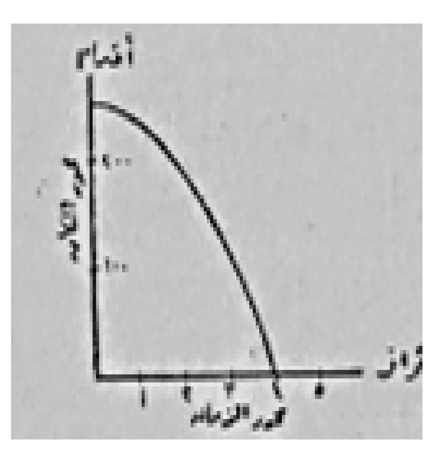
ولنفرض أننا سنتبع المقياس التالي:

١٠٠ قدم   ١ ثانية

سنرسم بعد ذلك خطين متعامدين، ونسمي الخط الأفقي بمحور الزمن مثلا، والخط الرأسي بمحور المكان. سنرى على الفور أننا يمكننا تمثيل جدولنا الزمني المكان بخمس نقاط في المستوى الذي اتبعناه لتمثيل الزمان والمكان.

وسنمثل أبعاد النقط عن محور المكان الإحداثيات الزمنية كما هي مسجلة في العمود الأول لجدولنا الزمني، وكذلك تمثل الأبعاد عن المحور الزمني للإحداثيات المكانية. وبذلك نكون قد عبرنا عن نفس الشيئ بالضبط بواسطة طريقتين مختلفتين تماما: الجدول الزمني، ونقاط المستوى، ويمكننا استنتاج كل من هاتين الطريقتين من الأخرى. ومسألة المفاضلة بين طريقتي التماثل هي مسألة ذوق لا أكثر، حيث أنهما متكافئتان تماما، لنخطو الآن خطوة أبعد من ذلك ونتصور جدولا زمنيا أدق من الجدول السابق يعطينا أوضاع الحجر الساقط، لا لكل ثانية فقط بل لكل ١\١٠٠ أو ١\١٠٠٠ من الثانية، وبهذا سيكون لدينا عدد كبير جدا من النقاط في مستوانا الزماني – المكاني. وإذا عرفنا الأوضاع في كل لحظة أو إذا كانت الإحداثيات المكانية معلومة بدلالة الزمن كما يقول الرياضيون فإن مجموعة النقاط التي لدينا تكون خطأ متصلا.

وبذلك يكون الرسم التالي ممثلا للمعلومات الكاملة عن الحركة، وليس لجزء فقط من هذه المعلومات. وتمثل هنا الحركة على امتداد القضيب الصلب (البرج) – أي الحركة في فضاء ذي بعد واحد – بمنحن في متصل زمان ومكان



ذي بعدين اثنين. ولكل نقطة من متصلنا الزماني والمكاني عددان مميزان، يرمز أحدهما لإحداثي الزمان والآخر لإحداثي المكان، وبالعكس تشير أي نقطة في مستوى الزمان والمكان إلى عددين يحددان حدثا ما. وتمثل نقطتان متجاورتان حدثين عند مكانين وزمانين مختلفين قليلا عن بعضهما.

ولعلك تعترض على طريقة التمثيل هذه بقولك أنه لا معنى لتمثيل وحدة الزمن بخط صغير في الرسم البياني، ثم الربط بين الزمن والمكان في شكل متصل ذي بعدين من المتصلين الأحادي البعد. ولكن يجب عليك في نفس الوقت أن تعترض بنفس الشدة ضد جميع المنحنيات التي تمثل تغير درجة الحرارة في مدينة نيويورك أثناء الصيف الماضي مثلا أو ضد جميع المنحنيات التي تمثل درجة الحرارة في مدينة نيويورك أثناء الصيف الماضي مثلا، أو ضد جميع المنحنيات التي تمثل التغير في مستوى المعيشة خلال السنوات القليلة الماضية، حيث أن نفس طريقة التمثيل البياني متبعة في كل من هذه الأمثلة. ففي منحنيات درجة الحرارة

نجمع بين متصل درجة الحرارة الأحادي البعد ومتصل الزمن الأحادي البعد، مكونين متصلا ثنائي الأبعاد لدرجة الحرارة والزمن.

ولنرجع الآن إلى مثال الجسم الساقط من قمة البرج البالغ من الارتفاع ٢٥٦ قدما؛ فصورة الحركة البيانية هي طريقة ذات فائدة عظمى لأنها تمكننا من تعيين مكان الجسيم عند أية لحظة. ونود الآن تمثيل حركة الجسيم مرة أخرى إذا عرفنا كيف يتحرك، ويمكننا عمل ذلك بطريقتين مختلفتين.

ولعلنا نذكر صورة الجسيم الذي يغير مكانه بمرور الزمن في القضاء ذي البعد الواحد. ولم نخلط في تلك الصورة بين الزمن والمكان بل استخدمنا صورة ديناميكية تتغير فيها الأوضاع مع الزمن، ولكن يمكننا تصوير نفس الحركة بطريقة أخرى إستاتيكية نعتبر فيها منحنيا في متصل المكان والزمان ذي البعدين والمكان ذي البعدين، وليس كشيء يتغير في المتصل المكاني ذي البعد الواحد. وتتكافأ هاتان الصورتان تماما مع بعضهما، وليس تفضيل طريقة على أخرى سوى مسألة ذوق، وليست هناك أية علاقة بين كل ما قلناه الآن وبين نظرية النسبية. ويمكننا استخدام أي من الصورتين دون تفرقة على الرغم من أن الطبيعة الكلاسيكية قد فضلت الصورة الديناميكية التي تصف الحركة كحوادث واقعة في المكان وكأنه ليست لها وجود في متصل المكان والزمان.

ولكن النظرية النسبية غيرت وجهة النظر هذه، إذ كانت إلى حد كبير في جانب الصورة الإستاتيكية، ووجدت في كيفية تمثيل الحركة كشيء موجود في الزمان والمكان صوري أكثر ملاءمة وقربا من الحقيقة. وما زال علينا أن نجيب على هذا السؤال: لماذا لا تتكافأ صور تمثل الحركة من جهة نظر النظرية النسبية على الرغم من تكافئها من وجهة نظر الطبيعة الكلاسيكية؟

وسندرك الإجابة على هذا السؤال إذا اعتبرنا حركة مجموعتين إحداثيتين متحركتين بانتظام بالنسبة لبعضهما؛ فطبقا لقواعد الطبيعة الكلاسيكية يحدد المشاهدان المقيمان في هاتين المجموعتين إحداثيات مكانية، وزمن واحد لحدث ما وإذن في حالة مثالنا السابق يتميز انطباق الجسيم على سطح الأرض في مجموعتنا الإحداثية المختارة بالإحداثي الزمني "٤" وبالإحداثي المكاني "صفر" وسيظل الحجر - طبقا للميكانيكا الكلاسيكية - بأخذ أربع ثوان لكي يصل إلى سطح الأرض في نظر مشاهد يتحرك بانتظام للمجموعة الإحداثية المختارة. ولكن هذا المشاهد سيقيس المسافة في مجموعته الإحداثية وسيربط بين هذه الإحداثيات المكانية وحدث التصادم على الرغم من أن الإحداثي الزمني سيكون واحدا في نظره وفي نظر جميع المشاهدين الآخرين المتحركين بانتظام بالنسبة لبعضهم؛ فالطبيعة الكلاسيكية لا تعرف سوى زمن واحد مطلقا بالنسبة لجميع المشاهدين، وفي هذه الحالة يمكننا شطر المتصل ذي البعدين لكل مجموعة إحداثية إلى متصلين كل منهما ذي بعد واحد: الزمان والمكان. وبسبب الطلقة للزمن فإن الانتقال من الصورة

الإستاتيكية إلى الصورة الديناميكية له معنى نظري في الطبيعة الكلاسيكية.

ولكننا سبق أن اقتنعنا بأن التحويلات الكلاسيكية يجب ألا تستخدم فى علم الطبيعة بصفة عامة. ومن الناحية العملية تتحقق هذه التحويلات فقط في حالة السرعات الصغيرة. وطبقا لنظرية النسبية لن يكون زمن ارتطام الحجر مع سطح الأرض واحدا في نظر جميع المشاهدين، إذ سيختلف الإحداثي الزمني ملحوظا جدا إذا اقتربت السرعة النسبية من سرعة الضوء. ولا يمكننا شطر المتصل ذي البعدين إلى متصلين أحاديي البعد، كما هي الحال في الطبيعة الكلاسيكية. ويجب ألا نعتبر المكان والزمان على حدة في تعيين الإحداثيات المكانة والزمنية في مجموعة إحداثية أخرى.

ويظهر أن شطر المتصل ذي البعدين إلى المتصلين الإحداثيي البعد عملية اختيارية ليس لها أي معنى من وجهة النظر النسبية. ومن السهل تعميم ما سبق قوله في حالة الحركة العامة التي ليست في خط مستقيم، وفي الحقيقة أنه يلزمنا أربعة أرقام – لا رقمين اثنين – لوصف الأحداث في الطبيعة.

وفضاء علم الطبيعة كما نتصوره خلال الأجسام وحركتها لها ثلاثة أبعاد، وتتعين حركة هذه الأجسام بواسطة ثلاثة أرقام. وتكون اللحظة التي وقع فيها الحدث الرقم الرابع. وبذلك تشير أي أربعة أرقام معينة إلى

حدث ما، كما أن أي حدث يتحدد بواسطة مثل هذه الأرقام الأربعة. وإذن يكون عالم الأحداث متصلا ذا أربعة أبعاد. وليس في هذا شيئ من الغرابة. وتتحقق العبارة الأخيرة في حالتي الطبيعية الكلاسيكية ونظرية النسبية على السواء.

ومرة ثانية نكتشف وجود فرق عندما نعتبر حالة مجموعتين إحداثيتين متحركتين بالنسبة لبعضهما. لنفرض أن لدينا حجرة متحركة، وقد أخذ المشاهد المقيم داخلها وذلك المقيم خارجها في تعيين الإحداثيات المكانية الزمانية لحدث ما. سيحاول عالم الطبيعة الكلاسيكية شطر المتصل ذي الأربعة أبعاد إلى فضاء ذي ثلاثة أبعاد ومتصل زماني ذي بعد واحد.

سيهتم عالم الطبيعة القديمة فقط بالتحويلات المكانية حيث أن الزمن شيئ مطلق بالنسبة له، وسيجد أن شطر المتصل الرباعي الأبعاد إلى متصل المكان ومتصل الزمان شيئا طبيعيا وملائما. ولكن من وجهة نظر النسبية بتغير الزمن والمكان عند الانتقال من مجموعة إحداثية إلى أخرى، وتحدد لنا تحويلات لورنتز خواص تحويلات متصل الزمان والمكان ذي الأربعة لعالم الأحداث الطبيعية ذي الأبعاد الأربعة.

ويمكننا وصف عالم الأحداث ديناميكيا بصورة تتغير مع الزمن وممثلة في الفضاء ذي الثلاثة أبعاد. ولكن يمكن تمثيلها أيضا بصورة إستاتيكية في المتصل الزماني المكاني ذي الأبعاد الأربعة. ومن وجهة

نظر الطبيعة الكلاسيكية تتكافأ الصورتان الإستاتيكية والديناميكية، في حين أنه من وجهة النظر النسبية تعتبر الصورة الإستاتيكية أكثر ملاءمة وقربا إلى الحقيقي.

ويمكننا استخدام الصورة الديناميكية حتى في نظرية النسبة إذا فضلنا ذلك، ولكن يجب أن تتذكر أن هذا الانقسام إلى زمان ومكان ليس له أي معنى حقيقي حيث أن الزمن ليست له صفة الإطلاق. وسنستمر في استخدام اللغة الديناميكية لا الإستاتيكية في الصفحات المقبلة متذكرين جيدا مواطن قصورها.

النسبية العامة:

ما زالت لدينا نقطة في حاجة إلى استجلاء، إذ أننا لم نجب بعد على أحد الأسئلة الأساسية وهو: هل هناك مجموعة إحداثية قاصرة؟.. قد عرفنا بعض الشيئ عن قوانين الطبيعة وعدم تغيرها بالنسبة لتحويلات لورنتز وانطباقها على جميع المجموعات القاصرة المتحركة بانتظام بالنسبة لبعضها؛ فلدينا القوانين، ولكننا لا نعرف الإحداثيات التي تنسب إليها هذه القوانين. ولكي نزداد إلماما بهذه المشكلة، دعنا نناقش عالم الطبيعة الكلاسيكية، ونسأله بعض أسئلة بسيطة:

"ما هي المجموعة القاصرة؟"

"هي مجموعة إحداثية تتحقق فيها الميكانيكا، فالجسم الذي لا تؤثر عليه قوى خارجية يتحرك بانتظام في هذه المجموعة. وإذن يمكننا بفضل هذه الخاصية التمييز بين المجموعة الإحداثية القاصرة وبين أي مجموعة أخرى".

"ولكن ما هو معنى القول بعدم وجود قوى تؤثر على الجسم؟"

"معناه ببساطة أن الجسم يتحرى بانتظام في مجموعة إحداثية قاصرة".

وهنا يمكننا أن نضع مرة ثانية السؤال

"ما هي المجموعة الإحداثية القاصرة؟"

ولكن بما أنه ليس هناك أمل كبير في الحصول على إجابة تختلق عن الإجابة السابقة؛ فنحاول أن نحصل على بعض معلومات بتغيير السؤال.

"هل تعتبر المجموعة الإحداثية المثبتة في سطح الأرض مجموعة قاصرة؟"

"كلا، لأن القوانين الميكانيكا لا تنطبق تماما على سطح الأرض بسبب حركتها الدورانية، ولكن يمكننا اعتبار مجموعة إحداثية مثبتة في الشمس مجموعة إحداثية قاصرة في كثير من المسائل، ولكن عندما تتكلم عن حركة الشمس الدورانية فإننا نفهم ضمنيا أن مجموعة إحداثية مثبتة فيما لا يمكن اعتبارها قاصرة تماما"

"وإذن ما هي مجموعتك الإحداثية القاصرة وكيف تختار حركتها؟"

"المجموعة الإحداثية القاصرة هي مجرد فكرة خيالية فقط، وليست لديّ آية فكرة عن إمكان تحقيقها فإذا أمكنني أن أبتعد عن جميع الأجسام المادية وأحرر نفسي من جميع التأثيرات الخارجية فإن مجموعتي الإحداثية تكون حينئذ قاصرة" "ولكن ماذا تعني بمجموعة إحداثية محررة من التأثيرات الخارجية؟"

"أعنى أن المجموعة الإحداثية تكون قاصرة".

أي أننا قد رجعنا مرة أخرى إلى حيث بدأنا! وهكذا كشف لنا هذا الحوار عن صعوبة خطيرة في علم الطبيعة الكلاسيكي؛ فلدينا قوانين، ولكننا لا ندري إلى أي مجموعة إحداثية ننسبها إليها! وهكذا يبدو لنا أن عالمنا الطبيعي كله على أساس من الرمال.

ويمكننا مواجهة هذه المعضلة من جانب آخر، لنتصور أن الكون بأجمعه لا يحتوي سوى جسما ماديا واحدا سنجده ممثلا لمجموعتنا

الإحداثية، ولنفرض أن هذا الجسم بدأ يدور حول نفسه، فطبقا للميكانيكا الكلاسيكية ستكون القوانين الطبيعة للجسم الدائر مختلفة عن تلك المناظر لها في الجسم الساكن. فإذا كانت قاعدة القصور الذاتي صحيحة في حالة من هاتين الحالتين فإنهما لن تصح في الآخر، ولكن هذا القول غير سليم، إذ هل يصح لنا أن نعتبر حركة جسم واحد فقط في الكون بأجمعه؟ مع أننا نعني دائما بحركة الجسم "هذا التغير في موضعه بالنسب لجسم آخر". وإذن يكون من غير الطبيعي أن تتكلم عن حركة جسم واحدة فقط، وهكذا تتعارض الميكانيكا الكلاسيكية مع الطبيعة حول هذه المنطقة. والخروج من هذا المأزق فرض نيوتن أنه إذا كانت قاعدة القصور الذاتي صحيحة فإن المجموعة الإحداثية تكون إما ساكنة أو متحركة بحركة منتظمة، وإذن يتوقف قولنا بالحركة أو السكون على ما إذا كانت جميع القوانين الطبيعية تنطبق على مجموعة إحداثية معينة.

لنعتبر جسمين كالشمس والأرض مثلا؛ فالحركة التي نلاحظها هي حركة نسبية يمكن وصفها بتثبيت المجموعة الإحداثية بالأرض أو الشمس. ومن جهة النظر هذه يظهر لنا أن اكتشافات "كوبرنيكوس" العظيمة ليست سوى نقل المجموعة الإحداثية من الأرض إلى الشمس. ولكن بما أن الحركة نسبية ويمكننا استخدام أي مجموعة إحداثية فلن يكون لدينا أي سبب لتفضيل مجموعة إحداثية على أخرى.

وهنا يتدخل علم الطبيعة مرة أخرى ليغير وجهة نظرنا؛ فالمجموعة الإحداثية المتصلة بالشمس تشبه مجموعة قاصرة أكثر من تلك المتصلة بالأرض، ويجب أن تنطبق قوانين علم الطبيعة على مجموعة "كوبرنيكوس" الإحداثية أكثر من انطباقها علة مجموعة "بطليموس"، ويمكن تقدر أهمية اكتشاف "كوبرنيكوس" فقط من وجهة نظر علم الطبيعة، فهي ترينا الأهمية الفائقة لاستخدام مجموعة إحداثية مثبتة تماما في الشمس لوصف حركة النجوم.

ولا توجد حركة منتظمة مطلقة في علم الطبيعة الكلاسيكي؛ فإذا تحركت مجموعتان إحداثيتان بانتظام بالنسب لبعضهما فليس هناك معنى للقول بأن "هذه المجموعة الإحداثية ساكنة والأخرى متحركة". ولكن إذا كانت المجموعتان الإحداثيتان متحركتين بدون انتظام بالنسبة لبعضهما، فهناك ما يدفعنا للقول "هذا الجسم يتحرك، والآن ساكن (أو يتحرك بانتظام)" فالحركة المطلقة لها هنا معنى محدد تماما، وتوجد هنا هوة سحيقة تفصل بين المنطق من جانب والطبيعة الكلاسيكية من جانب آخر. وترتبط الصعوبات المذكورة والمتعلقة بالمجموعة القاصرة وبالحركة المطلقة ببعضها، ويمكن أن تحدث الحركة المطلقة فقط على أساس المجموعة القاصرة التي تتحقق فيها قوانين الطبيعة.

ولعله يبدو أنه هناك مخرج من هذه الصعوبات وأنه ليست هناك نية يمكن أن تكون بمنجى منها، ويرجع ذلك إلى حقيقة كون قوانين الطبيعة تتحقق فقط في مجموعة خاصة من المجموعات الإحداثية أي

المجموعة القاصرة. ويتوقف حل هذه المصاعب على الإجابة على السؤال التالي: هل يمكننا صياغة قوانين الطبيعة بحيث تتحقق في جميع المجموعات الإحداثية؟ ليس فقط في تلك التي تتحرك بانتظام، بل أيضا في تلك التي تتحرك أية حركة اختيارية بالنسبة لبعضها البعض؟ إذا كان هذا في استطاعتنا فإننا سنتغلب على مصاعبنا وسنكون حينئذ قادرين على تطبيق قوانين الطبيعة في أية مجموعة إحداثية. ولن يكون هناك حينئذ أي معنى للتناحر بين آراء بطليموس وكوبرنيكوس الذي ازداد حدة في الأيام الأولى من تاريخ العلم. إذ يمكن استخدام أي مجموعة إحداثية دون تفصيل، وسيكون للجملتين "الشمس ساكنة والأرض متحركة" و"الشمس متحركة والأرض ساكنة" معنيان مختلفان خاصان بمجموعتين إحداثيتين مختلفتين.

هل نستطيع حقا أن نبني علم طبيعة نسبي، يتحقق في جميع المجموعات الإحداثية؟ علم طبيعة ليس به مكان بالمطلق ولكن فقط للحركة النسبية؟

حقا إن هذا ممكن!!

ولدينا على الأقل دليل – رغما من عدم قوته – يرشدنا إلى طريقة بناء علم الطبيعة الحديث. يجب أن ينطبق علم الطبيعة الحديث على جميع المجموعات الإحداثية وأن ينطبق كذلك على الحالة الخاصة للمجموعة الإحداثية القاصرة. ونحن نعلم الآن قوانين المجموعة

الإحداثية القاصرة. ويجب أن تتحول القوانين العامة الجديدة المتحققة في جميع المجموعات الإحداثية، في الحالة الخاصة القاصرة إلى القوانين القديمة المعروفة.

وقد حلت معضلة صياغة قوانين علم الطبيعة لكل مجموعة إحداثية، بما يسمى بنظرية النسبية الخاصة. ولا يمكن للنظريتين طبعا أن تتعارضا مع بعضهما، حيث أننا يجب دائما أن نجعل القوانين العامة للمجموعة الإحداثية القاصرة تشمل القوانين القديمة لنظرية النسبية الخاصة. وكما كانت المجموعة الإحداثية القاصرة فيما مضى المجموعة الوحيدة التي صيغت فيها قوانين علم الطبيعة، فإنها الآن ستكون هي الحالة النهائية الخاصة، حيث أنه قد أصبح من الممكن لجميع المجموعات الإحداثية أن تتحرك أية تحركات اختيارية بالنسبة لبعضها البعض.

وهذا هو برنامج نظرية النسبية العامة. ولكننا يجب أن نكون أكثر غموضا عن ذي قبل، أثناء وصفنا للطريق الذي أدى إلى هذه النظرية؛ فالصعوبات الجديدة الناشئة من التطور العلمي تدفع نظريتنا لكي تكون أكثر إبهاما. وما زالت أمامنا مفاجآت غير منتظرة، ولكننا نهدف دائما إلى التواصل إلى فهم أعمق للحقائق، وقد أضيفت حلقات إلى سلسلة المنطق التي تربط بين النظرية والتجربة. ولكي نزيل من الطريق المؤدي من النظرية إلى التجربة (المشاهدة) الافتراضات المفضلة غير الضرورية، يجب علينا أن نزيد في طول السلسلة كثيرا، وكلما كانت فروضنا أساسية

وأكثر سهولة كلما ازدادت وسائلنا الرياضية تعقيدا، وأصبح الطريق من النظرية إلى التجربة أطول وأكثر غموضا وتعقيدا، ويمكننا القول – رغما عما يبدو في ذلك من تناقض – بأن علم الطبيعة الحديث أسهل من علم الطبيعة القديم، وإذن فهو يبدو أكثر صعوبة وتعقيدا. وكلما ازدادت معها قوة إيماننا بتناسق الكون ونظامه الدقيق.

وفكرتنا الجديدة بسيطة! أن نبني علم طبيعة يتحقق في جميع المجموعات الإحداثية، ويؤدى تحقيق ذلك إلى صعوبات جمة ويدفعنا إلى استخدام وسائل رياضية تختلف عن تلك التي استخدمناها حتى الآن في علم الطبيعة. وسنشرح هنا فقط العلاقة بين تحقيق هذا البرنامج وبين مشكلتين أساسيتين وهما الجاذبية والهندسية.

خارج وداخل المصعد.

يعتبر قانون القصور الذاتي أول تقدم كبير في علم الطبيعة، بل حري بنا أن نعتبره البداية الحقيقة لهذا العلم، وقد نشأ هذا القانون من التأمل في تجربة مثالية أي في حالة جسم يتحرك باستمرار دون أية مقاومة ودون أي تأثير لقوى خارجية. ومن هذا المثال وأمثلة أخرى كثيرة بعد ذلك أدركنا أهمية التجربة المثالية في دراستنا. وسندرس هنا أيضا تجارب أخرى مثالية، وعلى الرغم من أن هذه التجارب ستبدو خيالية، فإنها مع ذلك ستساعدنا على فهم كل ما نستطيع فهمه من نظرية النسبية باستخدام وسائلنا البسيطة.

وقد كان لدينا فيما سبق التجارب المثالية التي قمنا بها مستخدمين الحجرة المتحركة، وسنستخدم الآن على سبيل التغيير مصعدا هابطا إلى سطح الأرض.

لنتصور مصعدا ساكنا عند قمة سحاب، أعلى بكثير من جميع الناطحات الحقيقية، ولنفرض أن الأسلاك الحاملة للمصعد انقطعت فجأة، وأن المصعد أخذ في القيام ببعض تجارب أثناء الهبوط، ولن ندخل في اعتبارنا وجود مقاومة الهواء أو الاحتكاك في هذه التجربة المثالية. لنفرض أن أحد المشاهدين قد أخرج من أحد جيوبه منديلا وساعة، ثم تركهما يسقطان، فماذا يحدث لهذين الجسمين؟.. من وجهة نظر المشاهد الخارجي الذي يشاهد ما يحدث خلال نافذة المصدر سيرى أن المنديل والساعة سوف يسقطان نحو الأرض بنفس الطريقة وبنفس العجلة. ونحن نذكر أن عجلة جسم ساقط لا تتوقف أبدا على كتلته، وأن هذه الحقيقة هي التي أظهرت تساوي الكتلة الجاذبية والكتلة القاصرة (صفحة ٢٦). ونحن نذكر أيضا أن تساوي هاتين الكتلتين كان مجرد صدفة فقط من وجهة نظر الميكانيكا الكلاسيكية ولم يكن له أثر في تكوين هذه الميكانيكا. ومع ذلك فإننا نرى هنا أيضا أن هذا التساوي – الذي ظهر أثره في تساوي العجلة لجميع الأجسام الساقطة ذو أهمية كبيرة وأساسي جدا لدراستنا كلها.

لنعد مرة أخرى إلى موضوع المنديل والساعة الساقطين، فمن وجهة نظر المشاهد الخارجي يسقط كلا الجسمين بنفس العجلة، وإذن سيظل

بعدا الجسمين المذكورين عن قاع المصعد ثابتين لا يتغيران. أما من وجهة نظر المشاهد الداخلي فإن الجسمين سيظلان دائما في مكانهما، تماما كما تركهما المشاهد، وسيتجاهل المشاهد الداخلي مجال الجاذبية حيث أن مصدره يقع خارج مجموعته الإحداثية. وسيجد أنه ليست هناك أية قوى داخل المصعد تؤثر على الجسمين، ولذا فهما في حالة سكون، تماما كما لو كانا في مجموعة إحداثية قاصرة. وسنرى أن أمورا غريبة تحدث داخل المصعد! فإذا دفع المشاهد جسما في اتجاه – إلى أسفل أو إلى أعلى مثلا – فإن هذا الجسم سيظل دائما يتحرك حركة منتظمة، ما دام لا يرتطم بسقف المصعد أو قاعدته. وباختصار فإن قوانين الميكانيكا الكلاسيكية تتحقق داخل المصعد في نظر المشاهد الداخلي. وسنتحرك جميع الأجسام طبقا لقانون القصور الذاتي. وستختلف مجموعتنا الإحداثية الجديدة المثبتة في المصعد الساقط عن المجموعة الإحداثية القاصرة في نقطة واحدة. يتحرك الجسم الذي لا تؤثر عليه أي قوة بانتظام إلى الأبد في المجموعة الإحداثية القاصرة. ولا تتقيد المجموعة الإحداثية القاصرة –كما فرضت في علم الطبيعة الكلاسيكي – بمكان أو زمان. وحالة المشاهد في مصعدنا مختلفة إذ أن خاصية القصور الذاتي في مجموعته الإحداثية مقصورة على المكان والزمان. وسيأتي الوقت الذي يصطدم فيه المصعد مع سطح الأرض فيقضي على المشاهدين وعلى تجاربهم أجمعين. فليست المجموعة الإحداثية سوى صورة مصغرة لمجموعة إحداثية قاصرة حقيقية.

والطابع المحلي للمجموعة الإحداثية جد أساسي. وإذا كان طول قاعدة مصعدها الهابط يمتد من القطب الشمالي إلى خط الاستواء، ووضعنا المنديل فوق القطب الشمالي والساعة فوق خط الاستواء؛ فإن المشاهد الخارجي سيحكم بأن هذين الجسمين لن تكون لهما نفس العجلة، وإذن لن يكون المصعد ذا أبعاد محددة بحيث تكون عجلة جميع الأجسام ثابتة للمشاهد الخارجي. وعلى هذا الأساس، يكون للمجموعة الإحداثية صفة القصور الذاتي بالنسبة للمشاهد الداخلي. ويمكننا دائما إيجاد مجموعة إحداثية تتحقق فيها جميع القوانين الطبيعية على الرغم من كونها محدودة في المكان والزمان. فإذا تخيلنا مجموعة إحداثية أخرى، كمصعد آخر يتحرك بانتظام بالنسبة للمصعد الآخر الساقط تحت تأثير الجاذبية وحدها فإن كلا من هاتين المجموعتين الإحداثيتين ستكون قاصرة محليا، وستكون القوانين نفسها متحققة في كلا المجموعتين، ويمكننا الانتقال من مجموعة إلى أخرى باستخدام تحويلات لورنتز.

ولنستمع الآن إلى وصف كل من المشاهدين الخارجي والداخلي لما يحدث داخل المصعد.

سيلاحظ المشاهد الخارجي حركة المصعد وجميع الأجسام الكائنة داخله وسيجدها متفقة مع قانون نيوتن للجاذبية. وبالنسبة له لن تكون الحركة منتظمة بل ذات عجلة بسبب فعل مجال الجاذبية الأرضية. ولكن إذا افترضنا وجود جيل من علماء الطبيعة ولدوا ونشأوا في المصعد

فإن آراؤهم بصدد ما يحدث في المصعد ستكون جد مختلفة، إذا سيعتقدون في وجود مجموعة قاصرة وسينسبون جميع قوانين الطبيعة إلى مصعدهم، لأنهم يعتقدون – بحق – أن القوانين تأخذ صورة بسيطة في مجموعتهم الإحداثية. وسيكون من الطبيعي في رأيهم الفرض بأن مصعدهم ساكن لا يتحرك وأن مجموعتهم الإحداثية قاصرة.

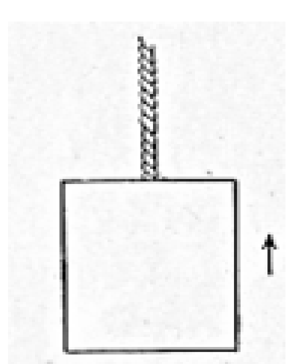
ومن المستحيل فض الخلاف في الرأي بين المشاهدين الخارجي والداخلي، فكل منهما يعتقد أن الصواب هو نسبة جميع الإحداث إلى مجموعته الإحداثية، ويمكن وضع كل من الرأيين في وصف الظواهر الطبيعية في صيغة مقبولة.

ونرى من هذا المثال أنه يمكن وضع نظريتين مقبولتين لوصف الظواهر الطبيعة في مجموعتين، حتى ولو لم يكونا متحركين بانتظام بالنسبة لبعضهما. وفي مثل النظريات يجب أن نعتبر "الجاذبية" فتكون بذلك "قنطرة" تمكننا من الانتقال من مجموعة إحداثية إلى أخرى. سيشعر المشاهد الخارجي بوجود مجال الجاذبية في حين أن المشاهد الداخلي لن يعترف بوجوده. سيرى المشاهد الخارجي أن المصعد يتحرك بعجلة في مجال الجاذبية الأرضية، في حين أن المشاهد الداخلي سوف يجزم بعدم وجود أي مجال الجاذبية في مجموعته، ولكن "القنطرة" – أي مجال الجاذبية – التي سببت إمكان صياغة القوانين في صورة مقبولة في كلا المجموعتين، تتصل اتصالا وثيقا بالتكافؤ بين كتلة الجاذبية

والكتلة القاصرة. وبدون هذا الدليل – الذي لم تنتبه إليه الميكانيكا الكلاسيكية – لن يكون هناك أي أساس لدراستنا الحالية.

لنعتبر الآن تجربة أخرى مثالية. لنفرض أن هناك مجموعة إحداثية قاصرة يتحقق فيها قانون القصور الذاتي. وقد سبق أن وصفنا ما يحدث في مصعد ساكن في مثل هذه المجموعة الإحداثية القاصرة، ولكننا سنغير تلك الصورة الآن.

لنفرض أن حبلا قد ثبت في المصعد وأن قوة ما ثابتة أخذت في شد المصعد إلى أعلى في الاتجاه المبين في الرسم. ولن يهمنا كيفية عمل ذلك، حيث أن قوانين الميكانيكا تتحقق في هذه المجموعة الإحداثية فإن المصعد كله سيتحرك بعجلة ثابتة في اتجاه الحركة. لنستمع الآن مرة أخرى إلى ما يقوله كل من المشاهدين الخارجي والداخلي في وصف الظواهر التي تحدث في المصعد.



المشاهد الخارجي: مجموعتي الإحداثية قاصرة. إني أشاهد المصعد يتحرك بعجلة ثابتة، لأن هناك قوة ثابتة تؤثر عليه، سيكون المشاهدون داخل المصعد في حركة مطلقة ولذا لن تتحقق قوانين الميكانيكا بالنسبة لهم، ولن يجدوا مثلا أن الأجسام التي لا تؤثر عليها أنه قوى تظل ساكنة. وإذا ترك جسم في هواء المصعد فإنه سرعان ما

يصطدم بقاعدة المصعد لأن تلك القاعدة تتحرك إلى أعلى مقتربة من الجسم الساقط. ويحدث مثل هذا تماما للساعة والمنديل. ويبدو من غير المألوف – في نظري – أن يظل المشاهد الداخلي ملازما لقاعدة المصعد، لأنه إذا قفز إلى أعلى فسرعان ما تلحق قاعدة المصعد.

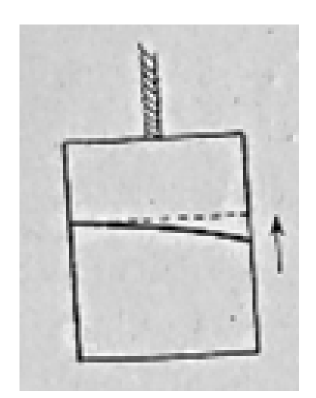
المشاهد الداخلي: إنني لا أرى ما يجعلني أعتقد أن المصعد في حركة مطلقة، وأعتقد أن مجموعتي الإحداثية المثبتة في المصعد ليست حقيقة مجموعة قاصرة ولكنني لا أدري أن هذا له علاقة بالحركة المطلقة؛ فساعتي ومنديلي وجميع الأجسام تسقط نحو القاعدة لأن المصعد كله وقع تحت تأثير مجال الجاذبية. وأشاهد نفس أنواع الحركة كما يشاهد المقيم على سطح الأرض بالضبط. وهو يشرحها بمنتهي البساطة على أساس الفرض بوجود مجال الجاذبية، وينطبق هذا الوصف تماما على الحالة التي أنا بها.

وهذا الوصف للظواهر الطبيعة من وجهتي نظر المشاهدين الخارجي والداخلي مقبول في حد ذاته، ولا يمكننا أن نقرر أيهما هو الصواب. ويمكننا اتباع أي منهما لوصف الظواهر التي تحدث في المصعد، إما الحركة غير المنتظمة وعدم وجود مجال الجاذبية في رأي المشاهد الخارجي، أو السكون ووجود مجال الجاذبية بالنسبة للمشاهد الداخلي.

ويمكن للمشاهد الخارجي أن يفرض أن المصعد في حركة مطلقة غير منتظمة، ولكن الحركة تحت تأثير مجال الجاذبية لا يمكن تسميتها حركة مطلقة. ولعل هناك طريقا للخلاص من التردد بين هاتين الطريقتين في وصف أحداث الطبيعة، ولعلنا نستطيع التواصل إلى رأي خاص باتباع هاتين الطريقتين.

لنفرض أن شعاعا من الضوء مر خلال المصعد في اتجاه أفقي خلال نافذة جاذبية ووصل إلى الجانب الآخر في برهة قصيرة، لنستمع مرة أخرى إلى رأى المشاهدين السابقين في مسار الضوء.

سيصف المشاهد الخارجي – الذي يعتقد في أن المصعد يتحرك بعجلة – هذه الظاهرة لنا بقوله: يدخل الشعاع الضوئي من نافذة المصعد ويتحرك أفقيا في خط مستقيم بسرعة ثابتة في اتجاه جدار المصعد المقابل للنافذة. ولكن المصعد يتحرك إلى أعلى، ولذا فإن الضوء عند وصوله إلى الجدار المقابل يكون المصعد قد ارتفع عن مكانه قليلا، وإذن سيقع الشعاع الضوئي على الجدار في نقطة أسفل من تلك التي تقابل نقطة دخول الشعاع الضوئي. وسيكون الفرق طفيفا جدا ولكن وجوده حقيقة لا شك فيها، وسيرى من بالمصعد أن الضوء لا يتحرك في خطوط مستقيمة بل في خطوط منحنية. وينجم هذا الفرق عن المسافة التي ارتفعها المصعد في نفس الزمن الذي يمر فيه الضوء خلاله.



سيقول المشاهد الداخلي – الذي يعتقد بوجود مجال الجاذبية الذي يؤثر على جميع الأجسام الموجودة بالمصعد – ليس هناك أية حركة ذات عجلة بالمصعد، ولكنني أشعر فقط بوجود مجال جاذبية. والشعاع الضوئي لا وزن له، وإذن لن يتأثر بفعل الجاذبية؛ فإذا أرسل شعاع في اتجاه أفقي فإنه سيقابل الحائط في نقطة تقابل تماما تلك التي أرسل منها.

ويبدو من هذا أن هناك احتمالا للحكم في جانب إحدى هاتين النظريتين المختلفتين، لأن الظاهرة الأخيرة ستكون مختلفة في نظر كل من المشاهدين. وإذا كان هناك شيئ غير منطقي في إحدى هاتين النظريتين فإن أسس دراستنا كلها تنهار، ولا يمكننا أن نصف كل الظواهر بطريقتين مقبولتين على أساس فرض وجود مجال للجاذبية أو عدم وجوده.

ومن حسن الحظ أن هناك خطأ كبيرا في تعليل المشاهد الداخلي، إذا يقول إن شعاع الضوء لا وزن له وبذلك لن يتأثر بفعل الجاذبية، لأن ذلك لا يمكن أن يكون صحيحا! فالشعاع الضوئي يحمل طاقة، وللطاقة كتلة. وتتأثر كل كتلة قاصرة بمجال الجاذبية لأن الكتلة المقصورة وكتلة الجاذبية متكافئتان. وإذن ينحني الشعاع الضوئي في مجال الجاذبية تماما كما يحدث لجسم قذف بسرعة الضوء في اتجاه أفقي. ولو أبدى

المشاهد الداخلي أسبابا صحيحة واعتبر انحناء الأشعة الضوئية في مجال الجاذبية لاتفقت نتائجه مع ما يراه المشاهد الخارجي.

وطبيعي أن مجال الجاذبية الأرضية ضعيف جدا لدرجة أننا لا نستطيع قياس انحناء الأشعة الضوئية عمليا. ولكن التجارب الشهيرة التي أجريت أثناء خسوف الشمس قد أظهرت بشكل قاطع – وإن يكن غير مباشر – تأثير مجال الجاذبية على مسار شعاع ضوئي. وينتج من هذه الأمثلة أن هناك أملا قويا في بناء علم الطبيعة على أساس النظرية النسبية. ولكن يجب أولا أن ندرس موضوع الجاذبية.

وقد رأينا من مثال المصعد الصورتين المقبولتين لوصف أحداث الطبيعة. قد نفرض وجود حركة غير منتظمة وقد لا نفرضها. ويمكننا حذف الحركة "المطلقة" من أمثالنا بفرض وجود مجال للجاذبية. أي أن الحركة غير المنتظمة ليس فيها شيئ من صفة الإطلاق، إذ أن مجال الجاذبية يقضي عليها قضاء مبرما.

ويمكننا طرد أشباح الحركة المطلقة والمجموعة الإحداثية القاصرة من علم الطبيعة وبناء علم طبيعة نسبي. وترينا تجاربنا المثالية كيف يرتبط موضوع نظرية النسبية العامة ارتباطا وثيقا مع موضوع الجاذبية ولماذا يعتبر تكافؤ الكتلة القاصرة مع كتلة الجاذبية ذا أهمية بالغة في هذا الارتباط. ومن الواضح أن حل موضوع الجاذبية في النظرية العامة للنسبية يجب أن يختلف عن الحل المبني على أساس نظرية نيوتن. يجب أن

تصاغ قوانين الجاذبية – ككل القوانين الطبيعية – لجميع المجموعات الإحداثية الممكنة، في حين أن قوانين الميكانيكا الكلاسيكية كما صاغها نيوتن تتحقق فقط في المجموعات الإحداثية القاصرة.

الهندسة والتجربة:

لعل مثالنا التالي يكون أكثر إمعانا في الخيال من أمثال المصعد الساقط. وعلينا الآن أن ندرس موضوعا جديدا وهو الصلة الموجودة بين نظرية النسبية العامة وبين الهندسة، ولنبدأ بوصف عالم تعيش فيه مخلوفات ذات بعدين فقط، وليست ذات أبعاد ثلاثة مثلنا، وقد عودتنا السينما على المخلوقات ذات البعدين التي تمثل وتعيش على الشاشة ذات البعدين أيضا. لنتصور أن هذه الأشكال الخيالية – أي الممثلين على الشاشة – لها وجود حقيقي وتتميز بالقدرة على التفكير والقيام بدراسات علمية وأن الشاشة ذات البعدين تمثل الفضاء الهندسي لهذه المخلوقات وستكون هذه المخلوقات عاجزة عن تخيل وجود فضاء ذي ثلاثة أبعاد، تماما كما أننا نعجز عن تخيل عالم ذي أربعة أبعاد. وستعرف هذه المخلوقات الخطوط المستقيمة والمنحنية والدوائر، ولكنها ستعجز عن بناء كرة لأن هذا يتطلب منها الابتعاد عن الشاشة ذات البعدين. ونحن في موقف مماثل إذ نستطيع ثني الخطوط المستقيمة والسطوح ولكن يشق علينا قصور انحناء فضاء ذي ثلاثة أبعاد.

وتستطيع الأشباح الثنائية الأبعاد الإلمام بأصول هندسة إقليدس ذات البعدين بواسطة المعيشة والتفكير والتجارب. فيمكنها مثلا إثبات أن مجموع زوايا المثلث تساوي ١٨٠درجة، ويمكنها كذلك رسم دائرتين متحدتين في المركز، إحداهما صغيرة والأخرى كبيرة. وسنجد أن نسبة محيطي هاتين الدائرتين إلى بعضهما تساوي نسبة نصف القطرين، وهي نتيجة مميزة لهندسة إقليدس. فإذا كانت الشاشة لا نهائية في الكبر فإن هذه المخلوقات ستجد أنها إذا حاولت القيام برحلة في خط مستقيم فإنها لن ترجع أبدا إلى النقطة التي بدأت منها رحلتها.

لنتصور أن هذه المخلوقات الثنائية الأبعاد تعيش في ظروف مختلفة. لنتصور مثلا أن شخصا من العالم ذي الثلاثة أبعاد قد حمل هذه المخلوقات ونقلها من الشاشة إلى سطح كرة ذات نصف قطر كبير جدا. فإذا كانت هذه الأشباح صغيرة جدا بالنسبة للسطح كله وإذا لم تكن لديهم وسائل للمواصلات البعيدة ولا يمكنهم التحرك طويلا فإنهم لن يدركوا أي تغير، فمجموع الزوايا في المثلثات الصغيرة ستساوى ١٨٠درجة، وستظل نسبة نصفي قطري دائرتين صغيرتين متحدتين في المركز كنسبة محيطهما، وستكون الرحلة في خط مستقيم غير مؤدية إلى نقطة الابتداء في رأيهم.

ولكن لنفرض أن هذه الأشباح قد أخذت بمرور الوقت في تنمية معلوماتها الفنية والعلمية فاكتشفوا وسائل للمواصلات تمكنهم من قطع المسافات الطويلة بسرعة؛ فسرعان ما يجدوا حينئذ أنه عند بدء رحلة

في خط مستقيم سيرجعون في النهاية إلى حيث بدأوا. وسيعني الخط المستقيم الدائرة الكبيرة للكرة. وستجد هذه الأشباح أيضا أن نسبة محيطي الدائرتين المتحدتين في المركز ليست مساوية لنسبة نصفي القطرين، إذا كان أحد نصف القطرين صغيرا والآخر كبيرا.

فإذا كانت مخلوقاتنا ذات البعدين محافظة وكانت قد تعلمت الهندسة الإقليدية منذ أجيال ماضية عندما لم يكن في استطاعتها السفر بعيدا، وعندما كانت هذه الهندسة منطبقة على الحقائق العلمية، فإنهم سيحاولون جاهدين التمسك بها رغم نتائج قياساتهم. سيحاولون نسبة تلك الاختلافات إلى أسباب طبيعية كمتغيرات في درجة الحرارة تؤدي إلى تغير أشكال الخطوط المستقيمة وتسبب خرق قواعد هندسية إقليدس. ولكنهم سيجدون إن آجلا أو عاجلا أن هناك طريقا أقرب إلى المنطق لوصف تلك الحوادث. سوف يدركون أن عالمهم محدد ذو قواعد هندسية تختلف عن تلك التي تعلموها. سيفهمون أنه على الرغم من عجزهم عن تخيل ذلك فإن عالمهم هو سطح كرة ثنائي الأبعاد، وسرعان ما سيتعلمون قواعد هندسية جديدة ستكون – على الرغم من اختلافها عن هندسة إقليدس – مصاغة في قالب منطقي مقبول، تنطبق على عالمهم ذي البعدين. وفي رأى جيل جديد، درج على معرفة هندسة الكرة ستظهر هندسة إقليدس القديمة أكثر تعقيدا وغير طبيعية لأنها لا تتفق مع الحقائق العلمية.

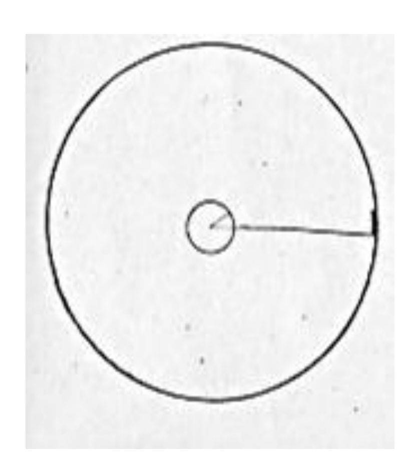
لنرجع الآن إلى مخلوقات عالمنا ذات الأبعاد الثلاثة.. ماذا نعني بقولنا أن العالم ذا الأبعاد الثلاثة له طابع إقليدي؟ معنى ذلك أننا نستطيع بالتجربة المباشرة إثبات جميع نظريات هندسية إقليدس المنطقية. ويمكننا بفضل استخدام الأجسام المتماسكة أو الأشعة الضوئية تكوين أو بناء أجسام تشبه الأجسام المثالية في هندسة إقليدس؛ فحافة المسطرة أو الشعاع الضوئي تشبه الخط المستقيم، وجميع زوايا الثلث المكون من قضبان متماسكة يساوى ١٨٠ درجة، ونسبة نصفي أقطار دائرتين متحدثين في المركز ومصنوعتين من سلك دقيق تساوى النسبة بين طولي المحيطين؛ فبهذه الطريقة تصبح هندسة إقليدس فصلا من علم الطبيعة.

ولكننا نستطيع تخيل اكتشاف انحرافات، فمثلا مجموع زوايا مثلث كبير مصنوع من قضبان صلبة متماسكة يختلف عن ١٨٠ درجة، ولكي ننفذ هندسة إقليدس يجب أن نفرض أن الأجسام ليست صلبة تماما، وبأنها لا تصلح لكي نستخدمها في تمثيل هندسة إقليدس. وسنحاول أن نوجد للأجسام تمثيلا أفضل يتفق مع مبادئ هندسة إقليدس. فإذا لم ننجح في الربط بين هندسة إقليدس وعلم الطبيعة في صورة بسيطة مقبولة فإن علينا أن ننبذ فكرة كون فضائنا إقليديا، ونبحث عن صورة أكثر تناسقا في تمثيل الحقيقة وتحتوي على افتراضات عامة متعلقة بالخواص الهندسية لفضاء عالمنا.

ويمكننا التدليل على ضرورة ذلك بتجربة مثالية تثبت لنا، أنه لكي يكون لعلم الطبيعة خواص نسبية حقيقة يجب ألا نبنيه على أساس الخواص الإقليدية. وستتطلب دراستنا نتائج معروفة خاصة بالمجموعات الإحداثية القاصرة ونظرية النسبية الخاصة.

لنتصور قرصا كبيرا مرسوما عليه دائرتان متحدتا المركز، إحداهما صغيرة والأخرى كبيرة جدا، ولنفرض أن القرص أخذ يدور بسرعة كبيرة بالنسبة لمشاهد خارجي في حين أن هناك مشاهدا آخر مستقر فوق هذا القرص. سنفرض أيضا أن مجموعة المشاهد الخارجي الإحداثية مجموعة قاصرة وأنه رسم في مجموعته الإحداثية نفس الدائرتين الصغرى والكبرى. وحيث أن الهندسة الإقليدية تتحقق في مجموعته، فإنه سيجد أن نسبة المحيطين ستساوى نسبة نصف القطرين. أما بخصوص المشاهد المستقر فوق القرص فإن علم الطبيعة الكلاسيكي وكذلك النظرية النسبية الخاصة لا تسمح لنا باتباع مثل هذه المجموعات الإحداثية، ولكن إذا رغبنا في البحث عن صيغ جديدة للقوانين الطبيعية تتحقق في أية مجموعة إحداثية فإننا يجب أن نهتم بدراسة وجهات نظر المشاهدين الداخلي والخارجي على حد سواء. ونحن هنا في الخارج نرقب المشاهد الداخلي في محاولته لقياس طول محيط ونصف قطر كل من الدائرتين على القرص الدائر، باستخدام نفس قضيب القياس الصغير الذي يستخدمه المشاهد الخارجي. وكلمة "نفس" هنا تعني إما حقيقة نفس المقياس بأن الشاهد الداخلي من الخارج أو بأنه كان أحد مقياس لهما نفس الطول في مجموعة إحداثية ساكنة.

سيبدأ المشاهد الداخلي من فوق القرص بقياس نصف القطر والمحيط للدائرة الصغيرة ويجب أن نتفق نتيجة مع نتيجة المشاهد الخارجي. وحيث أن محور دوران القرص يمر خلال مركز القرص فإن أجزاء القرص القريبة من المركز ستكون ذات سرعة بسيطة جدا. فإذا كانت الدائرة الصغيرة ذات نصف قطر صغير جدا فإننا يمكننا تجاهل النظرية النسبية الخاصة واستخدام الميكانيكا الكلاسيكية، وينتج من ذلك أن قضيب القياس سيكون له نفس الطول بالنسبة للمشاهدين الداخلي والخارجي، وأن نتيجة القياس ستكون واحدة بالنسبة لكليهما. لنفرض الآن أن المشاهد الداخلي قد بدأ في قياس نصف قطر الدائرة الكبيرة ووضع المقياس فعلا على نصف القطر مستمرا في عمليته. سيرى المشاهد الخارجي أن قضيب المقياس يتحرك في اتجاه عمودي على طوله، وبذا لن يعاني انكماشا في الطول وسيظل كما هو، أي ثابتا بالنسبة لجميع المشاهدين أي أن ثلاثا من الأربعة كميات التي نريد قياس أطوالها لن تتأثر بحركة دوران القرص وهي نصفا القطرين ومحيط الدائرة الصغيرة، ولكن الحالة



ليست كذلك بالنسبة للكمية الرابعة! فسيكون طول محيط في اتجاه الحركة سينكمش طوله بالنسبة للمشاهد الخارجي – أي بالنسبة إلى قضيب مقياسه – في مجموعته الساكنة. وحيث أن السرعة كبيرة جدا

بالنسبة لحالة الدائرة الصغيرة فإننا لا يمكننا التغاضي عن هذا الانكماش. فإذا استخدمنا نتائج نظرية النسبية الخاصة فإن استنتاجنا سيكون: أن نتائج قياس محيط الدائرة الكبيرة ستكون مختلفة بالنسبة للمشاهدين الداخلي والخارجي. وحيث أن إحدى الأطوال الأربعة المراد قياسها، فقط قد اختلفت، فإن نسبة (نصفي) لا يمكن أن تساوي نسبة (محيطي) الدائرة بالنسبة لكل من المشاهدين الداخلي والخارجي. ومن هذا ينتج أن هندسة إقليدس لا يمكن أن تنطبق على حالة القرص الدائر.

وعند الوصول إلى هذه النتيجة يمكن للمشاهد المستقر فوق القرص أن يعترض بقوله أنه يود اعتبار المجموعة الإحداثية التي لا تتحقق فيها هندسة إقليدس. وينسب عدم انطباق هندسة إقليدس إلى الحركة الدورانية المطلقة، إلى حقيقة كون مجموعته الإحداثية مجموعة غير مقبولة وغير مسموح لنا استخدامها.

ولكن الاعتراض بهذه الطريقة ينطوي على رفض المشاهد الداخلي قبول الفكرة الأساسية للنظرية العامة للنسبية. ومع ذلك فإذا رغبنا في نبذ الحركة المطلقة واتباع آراء النظرية العامة للنسبية فإن علم الطبيعة يجب أن يبنى على أساس نوع من الهندسة يكون أكثر تعميما من هندسة إقليدس. وليست هناك طريقة ما للتخلص من هذه النتيجة ما دام من المسموح به استخدام جميع المجموعات الإحداثية.

والتغييرات التي استحدثتها نظرية النسبية العامة لا تنحصر في المكان وحده. وقد كان لدينا في النظرية النسبية الخاصة ساعات متشابهة تماما وتدور بكيفية واحدة وكانت مثبتة في كل مجموعة إحداثية. ولعلنا نتساءل الآن عما يحدث لساعة تابعة لمجموعة إحداثية غير قاصرة. سنرجع ثانية إلى مثال القرص الدائر ونحاول استخلاص الإجابة. سيكون في حوزة المشاهد الخارجي مجموعة من الساعات المضبوطة والموحدة التقدير، مثبتة في مجموعته القاصرة. سيأخذ المشاهد الداخلي ساعتين من نفس النوع وسيضع إحداهما على الدائرة الداخلية الصغيرة والأخرى على الدائرة الخارجية الكبيرة. سيكون للساعة المثبتة في الدائرة الصغيرة سرعة صغيرة جدا بالنسبة للمشاهد الخارجي، ويمكننا إذن أن نقول بأن نظام توقيتها سيكون مشابها لتوقيت ساعة المشاهد الخارجي. ولكن سرعة الساعة المثبتة في الدائرة الكبيرة سرعة كبيرة جدا، ولذا فإن نظام توقيتها سيختلف كثيرا عن توقيت ساعات المشاهد الخارجي، وإذن ستختلف أيضا عن توقيت الساعة الموضوعة على الدائرة الصغيرة. وإذن سيكون نظام توقيت الساعتين الدائرتين مختلفا، وبتطبيق نتائج نظرية النسبية الخاصة نرى أنه في مجموعتنا الإحداثية ذات الحركة الدورانية لا يمكننا عمل ترتيبات مشابهة لتلك الموجودة في مجموعة إحداثية قاصرة.

ولإيضاح الاستنتاجات التي يمكننا الحصول عليها من هذه التجربة ومن مثيلاتها السابقة، سنذكر جانبا من الحديث الذي سبق ذكر بعضه بين العالم الطبيعي القديم "ق" الذي يؤمن بالطبيعة الكلاسيكية وبين

العالم الطبيعي الحديث "ح" الذي يعرف نظرية النسبية العامة. و"ق" هو المشاهد الخارجي في المجموعة الإحداثية القاصرة بينما "ح" هو المشاهد المقيم فوق القرص الدائر.

"ق": لا تتحقق الهندسة الإقليدية في مجموعتك الإحداثية. لقد شاهدت قياساتك وأوافقك على نسبة طولي المحيطين في مجموعتك الإحداثية ليست مساوية للنسبة بين نصفي القطرين. ولكن هذا يثبت أن مجموعتك الإحداثية مجموعة غير مسموح بها. أما مجموعتي فتتميز بطابع القصور الذاتي. ويمكنني استخدام هندسة جاليليو دون أي تفكير. والقرص الذي يدور بك ذو حركة مطلقة وإذن فهو يمثل مجموعة غير مقبولة من وجهة النظر الكلاسيكية، لا تتحقق فيها قوانين الميكانيكا.

"ح": لا أود سماع أي شيء يتعلق بالحركة المطلقة، وتستوي مجموعتي الإحداثية مع مجموعتك سواء بسواء، لا فرق بينهما. وقد نشأت ملاحظة عن حركة قرصك الدورانية بالنسبة للقرص الذي أقيم عليه. وليس هناك ما يمنعني من أن أنسب كل الحركات إلى القرص الذي أعيش فوقه.

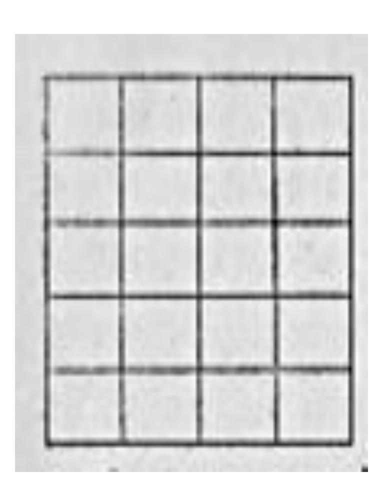
"ق": ولكن ألا تشعر بقوة غريبة تحاول دفعك بعيدا عن مركز القرص؟ فلو لم يكن قرصك دائري بسرعة كبيرة فإن ما لاحظته ما كان ليحدث أبدا. فإنك ما كنت تشعر بالقوة التي تدفعك إلى الخارج كما أنك ما كنت لتلاحظ أن هندسة إقليدس لا تنطبق في مجموعتك

الإحداثية، أما تعتقد أن في هذه الحقائق ما يكفي لإقناعك بأن مجموعتك الإحداثية في حركة مطلقة؟

"ح": كلا .. كلا! إني حقا قد لاحظت الظاهرتين اللتين أشرت إليهما ولكنني أعتقد ان هناك مجالا غريبا للجاذبية يؤثر على القرص ويعتبر مسئولا عن ظهور هاتين الظاهرتين، ويسبب اتجاه مجال الجاذبية إلى خارج القرص تغيرا في شكل القضبان المتماسكة ويؤثر على نظام توقيت الساعات ذات التوقيت المختلف كلها مرتبطة ببعضها ارتباطا وثيقا. ولكي تصبح مجموعتنا الإحداثية مقبولة يجب علي في نفس الوقت أن أفرض وجود مجال مناسب للجاذبية ذي تأثير على القضبان المتماسك والساعات.

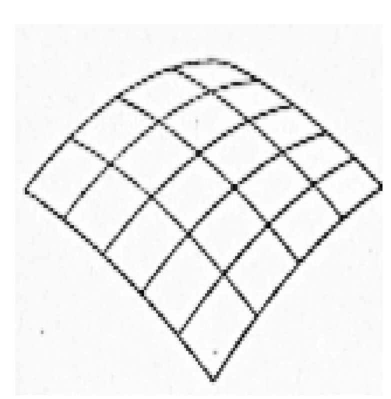
"ق": ولكن هل أنت متنبه إلى الصعوبات المتسببة عن نظريتك العامة للنسبية؟ ولكي أوضح ما أرمي إليه سأسوق مثالا لا يمت بصلة إلى علم الطبيعة. لنتصور مدينة أمريكية مثالية تتكون من شوارع متوازية وأخرى عمودية عليها، مع فرض أن المسافة بين كل شارعين واحدة في جميع الحالات. وإذن تكون مجموعات المباني متماثلة دائما في الشكل. وبهذه الطريقة يمكنني بسهولة تمييز موقع أي مجموعة من مجموعات المباني، ولكن مثل هذا النظام سيكون مستحيلا بدون هندسة إقليدس. فمثلا لا يمكننا تقسيم سطح الأرض كله بنفس الطريقة التي قسمنا بها مساحة المدينة الأمريكية. ونظرة واحدة إلى خريطة العالم تقنعنا بهذا. وكذلك لا يمكننا تقسيم القرص الذي نعيش عليه بنفس

الطريقة. وأنت تدعي أن مجال الجاذبية يؤثر على أبعاد قضبانك، ولا شك أن عجزك عن إثبات نظرية إقليدس الخاصة بتساوي نسبة أنصاف الأقطار ومحيطات الدوائر ليثبت لك بوضوح أنك إذا قمت بمثل هذا التقسيم للشوارع فإنك ستقابل إن آجلا أو عاجلا صعابا كثيرة، وسنجد أن مثل هذا العمل لا يمكن القيام به على سطح المنحنى حيث لا يمكننا إقامة مثل هذا النظام على بقعة كبيرة من السطح. ولذكر مثال ذي صلة بعلم الطبيعة سنعتبر مستوى يسخن بغير انتظام في نقطة مختلفة من سطحه. فهل يمكنك بواسطة استخدام قضبان حديدية صغيرة متمددة في الطول بتأثير الحرارة، إتمام عملية تقسيم المستوى إلى شوارع متوازية وأخرى متعامدة كالمرسومة في الشكل المرفق؟ بالطبع لا! إن مجال الجاذبية الذي تفرضه يؤثر على قضبانك كتأثير التغير في درجة الحرارة على القضبان الحديدية الصغيرة.



"ح": كل هذا لا يروعني. إن الغرض من نظام الشوارع المتوازية والمتعامدة كان لتعيين أماكن النقط، وتستخدم الساعة لتنظيم وقوع الأحداث ولا يلزم أن تكون المدينة أمريكية، بل قد تكون مدينة أوربية قديمة. لنفرض أن مدينتنا المثالية قد صنعت من الصلصال ثم غيرت أشكالها بعد ذلك. سأستطيع مع ذلك أن أتذكر مجموعات المنازل والشوارع المتوازية والأخرى المتعامدة على الرغم من أنها لم تعد

متوازية وعلى أبعاد متساوية من بعضها. وبالمثل ترمز خطوط الطول والعرض على سطح أرضنا إلى أوضاع النقط رغما عن عدم وجود "نظام تقسيم المدينة الأمريكية".



"ق": ما زالت هناك صعوبة؛ فأنت مضطر دائما إلى استخدام "نظام المدينة الأوربية"، وأنا أوافقك على أنه يمكنك تنظيم النقاط أو الأحداث، ولكن هذا التنظيم سيحدث اضطرابا في جميع قياسات المسافات، ولن يعطيك الخواص المقياسية للعالم كما هي الحالة في التنظيم الذي سبق أن ذكرته. فمثلا في مدينتي الأمريكية، لكي تقطع مسافة متكافئة لعشرة مجموعات بنائية، يجب أن تسير ضعف مسافة خمس مجموعات. وحيث أنني أعلم أن جميع المجموعات متساوية فسأستطيع تعيين المسافات على الفور.

"ح": هذا صحيح، ففي "نظام مدينتي الأوربية" لا أستطيع قياس المسافات فورا بعدد المجموعات ذات الأشكال المتغيرة. ويجب أن أعرف شيئا أكثر، يجب أن أعرف الخواص الهندسية للسطح. فكما نعرف أن المسافة عند خط الاستواء بين خطي طول ٠ ، ١٠° لا تساوى المسافة بين ٠ ، ١٠° عند القضيب الشمالي، فإنه في استطاعة كل بحار أن يعرف المسافة بين مثل هاتين النقطتين على سطح الأرض لأنه

يعرف خواصها الهندسية. ويمكنه عمل ذلك إما بطريق الحياد المبني على أساس معرفته لحساب المثلثات الكري أو عمليا بقياس المسافة بواسطة تحريك سفينة بسرعة ثابتة في كلا المسافتين. أما في حالتك فالمسألة جد بسيطة، لأن كل الشوارع تبعد عن بعضها بنفس المسافة. والأمر أكثر تعقيدا على سطح الأرض لأن خطى الزوال ٠ ، ١٠ □ يتقابلان عند قطب الأرض الشمالي، وتبلغ المسافة بينهما نهايتها العظمى عند خط الاستواء. وبالمثل في حالة "نظام مدينتي الأوربية" يجب أن أعرف شيئا أكثر مما نعرفه في حالة مدينتك الأمريكية، لكي أقدر المسافات. ويمكنني معرفة هذه المعلومات الإضافية بدراسة الخواص الهندسية لعالمي في كل حالة خاصة.

"ق": ولكن هذا كله يهدف إلى إظهار الصعوبات والتعقيدات التي تنشأ عند نبذ النظام البسيط الناتج عن هندسة إقليدس، واتباع نظام السقالة المعقدة الذي لا بد لك من استخدامه. فهل هناك ضرورة لذلك؟

"ح": نعم لا مفر من ذلك، إذا أردنا تطبيق علم الطبيعة على أية مجموعة إحداثية، دون الإشارة إلى المجموعة الإحداثية القاصرة المهمة. وأنا أوافقك على أن وسائلي الرياضية أكثر تعقيدا من وسائلك، ولكن فوضى الطبيعة أكثر بساطة وأقرب إلى الطبيعة من فروضك.

وقد انحصرت دراستنا حتى الآن في عالم ذي البعدين. ويتركز اهتمام النظرية العامة للنسبية في عالم أكثر تعقيدا، هو علم الزمان

والمكان ذو الأربعة الأبعاد. ولكن الآراء والمعتقدات هي نفسها التي ذكرها في حالة البعدين. ولا يمكننا استخدام "السقالة الميكانيكية" ذات القضبان المتوازية والمتعامدة والساعات المضبوطة في نظرية النسبية العامة، كما في نظرية النسبية الخاصة. وفي أية مجموعة إحداثية لا يمكننا تعيين النقطة واللحظة اللتين يقع عندها الحدث، باستخدام قضبان متماسكة وساعات مضبوطة ذات نظام توقيت موحد، كما هي الحال في المجموعة الإحداثية القاصرة المفروضة في نظرية النسبية الخاصة. ولكن يمكننا تنظيم الأحداث بواسطة قضباننا غير الإقليدية وساعاتنا ذات التوقيت المختلف. ولكن القياسات الفعلية التي تحتاج إلى قضبان متماسكة وساعات مضبوطة ذات نظام توقيت موحد، يمكن عملها فقط في المجموعات الإحداثية القاصرة المحلية. وتتحقق نظرية النسبية الخاصة في هذه المجموعات الأخيرة، ولكن مجموعتنا الإحداثية الصحيحة محلية فقط وخواصها القاصرة محدودة في المكان والزمان. ويمكننا التنبوء في أية مجموعة إحداثية بنتائج القياسات التي تقوم بها في المجموعة الإحداثية القاصرة.

ولعمل ذلك يجب أن نعرف الخواص الهندسية لعالمنا المكاني – الزماني.

وتوضح لنا تجاربنا المثالية فقط الخواص العامة لعلم الطبيعة النسبي الحديث، وتظهر لنا هذه التجارب أن موضوعنا الرئيس هو

الجاذبية، وأن النظرية العامة للنسبة تؤدي إلى تعميم أكبر لمعتقدات المكان والزمان.

النسبية العامة وتحقيقها:

تحاول النظرية العامة للنسبية صياغة القوانين الطبيعية لكي تتحقق في جميع المجموعات الإحداثية، والموضوع الأساسي للنظرية هو الجاذبية. وتبذل النظرية أول محاولة جديدة – منذ عهد نيوتن – لصياغة قانون الجاذبية، فهل هذا ضروري، مع ما نلمسه من انتصارات نظرية نيوتن والتقدم الكبير في علم الفلك المبني على أساس قانون نيوتن للجاذبية؟ ومع أن هذا القانون لا يزال يعتبر حتى الآن أساسا لكل الحسابات الفلكية. ومن ناحية أخرى لا تخفى علينا الاعتراضات على هذه النظرية القديمة.

ويتحقق قانون نيوتن فقط في المجموعات الإحداثية القاصرة لعلم الطبيعة الكلاسيكي، أي في المجموعات الإحداثية التي يشترط فيها – كما نذكر – تحقيق قوانين الميكانيكا. وتتوقف القوة الموجودة بين كتلتين على المسافة الموجودة بينهما. والعلاقة الموجودة بين القوة والمسافة هي كما نعلم لازمة – أي لا تتغير – بالنسبة للتحويلات الكلاسيكية. ولكن هذا القانون لا يتفق ونظرية النسبية الخاصة؛ فليست المسافة لازمة بالنسبة لتحويلات لورنتز. ويمكننا أن نحاول – كما فعلنا بنجاح في حالة قوانين الحركة – تعميم قانون الجاذبية لكي نجعله يتفق

مع نظرية النسبية الخاصة أو بعبارة أخرى نصوغه بحيث يكون لازما بالنسبة لتحويلات لورنتز، لا بالنسبة للتحويلات الكلاسيكية. ولكن قانون نيوتن للجاذبية قاوم بعناد جميع الجهود التي بذلت لتبسيطه وجعله متمشيا مع نظرية النسبية الخاصة.

وحتى إذا فرضنا نجاحنا في ذلك فإن هناك خطوة أخرى ضرورية لا بد منها: هي الانتقال من المجموعة الإحداثية الاختيارية إلى نظرية النسبية العامة. ومن وجهة أخرى فإننا نرى بوضوح من التجارب المثالية المتعلقة بالمصعد الساقط أنه لا مندوحة لنا في حل مشكلة الجاذبية لكي نتمكن من صياغة نظرية النسبية العامة. ويتضح لنا من دراستنا سبب اختلاف حل موضوع الجاذبية في علم الطبيعة الكلاسيكي عنه في النسبية العامة.

وقد حاولنا إيضاح الطريق المؤدي إلى النظرية العامة للنسبية والأسباب التي تدفعنا مرة أخرى إلى تغيير آرائنا القديمة. وسنحاول – دون أن ندخل في تفاصيل التركيب الرياضي للنظرية – إظهار بعض خصائص لنظرية الجاذبية الجديدة تميزها عن النظرية القديمة. ولن يكون من العسير علينا التنبه إلى طبيعة هذه الفروق نظرا لما سبق لنا إيضاحه:

١ – يمكن تطبيق معادلات الجاذبية لنظرية النسبية العامة في أي مجموعة إحداثية. وسيكون لأى شخص حرية اختيار المجموعة الإحداثية المناسبة في أي مسألة خاصة. وستكون كل المجموعات الإحداثية

شكليا في نظرنا. وبإهمال الجاذبية نرجع أوتوماتيكيا إلى المجموعة الإحداثية القاصرة في النظرية النسبية الخاصة.

٢ – يربط قانون الجاذبية بين حركة جسم في لحظة ما بمكان معين وبين فعل جسم نفس اللحظة على مسافة بعيدة من الجسم الأول. وهذا هو القانون الذي وضع لنا أساس نظريتنا الميكانيكية كلها، ولكن النظرية الميكانيكية قد انهارت، ولمسنا في قوانين ماكسويل نظاما جديدا لقوانين الطبيعة. ومعادلات ماكسويل هي قوانين بنائية، إذ أنها تربط الأحداث التي تقع الآن في مكان ما بتلك التي ستحدث بعد فترة وجيزة في نقطة قريبة، وهي تؤدى إلى القوانين التي تصف التغيرات في المجال الكهرومغناطيسي. ومعادلات الجاذبية الجديدة هي أيضا معادلات بنائية تصف التغيرات في مجال الجاذبية. ويمكننا القول بأن الانتقال من قانون نيوتن للجاذبية إلى النسبية العامة يشبه لحد ما الانتقال من الموائع الكهربائية وقانون كولوم إلى نظرية ماكسويل.

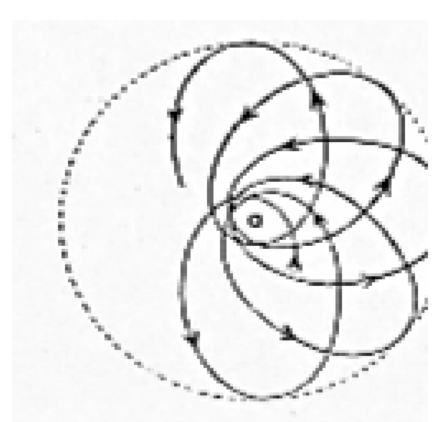
(٣) وليس عالمنا إقليديا، وتتكيف طبيعته الهندسية بالكتل الموجودة وسرعها. وتحاول معدلات الجاذبية في نظرية النسبية العامة إظهار الخواص الهندسية للعالم.

ولنفرض الآن أننا نجحنا في إتمام برنامج نظرية النسبية العامة، ولكن ألسنا في خطر الحصول على استنتاجات قد تكون بعيدة عن الحقيقة، ونحن نعلم أن النظرية القديمة تشرح تماما المشاهدات

الفلكية؟.. هل يمكننا مطابقة النظرية الجديدة بالمشاهدات العلمية؟.. ويجب تحقيق كل نتائج نظرية النسبية عمليا، ونبذ أي نتائج – مهما كانت شيقة وجذابة – إذا كانت تتعارض مع الحقائق العملية، ولماذا كانت نتيجة مقارنة نظرية الجاذبية الجديدة بالحقائق العملية؟ يمكننا الإجابة على هذا السؤال بعبارة واحدة: النظرية القديمة هي حالة خاصة نهائية للنظرية الجديدة. فإذا كانت القوى الجاذبية ضعيفة نسبيا، فإن قانون نيوتن القديم يصبح قريبا جدا من قانون الجاذبية الجديد. وإن ينتج أن النتائج التي تؤيد النظرية الكلاسيكية ستؤيد أيضا النظرية العامة للنسبية. وها نحن قد وصلنا ثانية إلى النظرية القديمة عن طريق النظرية الجديدة.

وحتى على فرض عدم وجود مشاهدات إضافية تؤيد النظرية الجديدة، وإذا كانت شروحها صالحة تماما مثل القديمة وكان علينا أن نختار بين النظريتين، فإنه يجب علينا بلا شك أن ننحاز إلى جانب النظرية الجديدة. ومعادلات النظرية الجديدة هي أكثر تعقيدا من الوجهة الشكلية ولكن فروضها – من وجهة نظر الافتراضات الأساسية – أكثر سهولة. فقد اختفى الشبحان المخيفان: الزمن المطلق، والمجموعة القاصرة.. ولم تتغاض عن تكافؤ الكتلتين القاصرة والجاذبية، ولن تحتاج إلى فرض بخصوص القوى الجاذبية وتوقفها على المسافة، ولمعادلات الجاذبية شكل القوانين البنائية وهو الشكل المطلوب لجميع القوانين الطبيعية منذ الانتصارات الرائعة لنظرية المجال.

وقد أمكننا الحصول على استنتاجات جديدة من قوانين الجاذبية الجديدة، لا يشملها قانون نيوتن للجاذبية. وإحدى هذه الاستنتاجات هي ظاهرة انحناء الأشعة الضوئية في مجال الجاذبية التي نوهنا عنها فيما سلف. وسنذكر الآن مثالين آخرين: إذا كانت القوانين القديمة تنتج من الجديدة عندما تكون القوى الجاذبية ضعيفة فإننا يمكننا توقع الانحراف عن قانون نيوتن للجاذبية فقط في حالة مجالات الجاذبية القوية. لنعتبر مجموعتنا الشمسية مثلا. فالكواكب – بما فيها الأرض – تتحرك في مسارات حول الشمس على شكل قطاعات ناقصة.



وأقرب هذه الكواكب إلى الشمس هو المشترى، وإذن يكون التجاذب بين الشمس والمشترى أقوى من ذلك الموجود بين الشمس وأي كوكب آخر، لأن بعده أقل من أبعاد الكواكب الأخرى. فإذا كان هناك أمل في إيجاد انحراف عن قانون نيوتن، فإن احتمال وجوده يكون أقوى في حالة المشترى. وينتج عن النظرية الكلاسيكية أن مسار كوكب المشترى لا يختلف في شئ عن مسار أي كوكب آخر سوى أنه أكثرها قربا إلى الشمس.. أما في حالة النظرية النسبية العامة، فيجب أن تكون الحركة مختلفة قليلا، فلن يتحرك المشترى حول الشمس في قطع ناقص فقط، بل إن هذا القطع الناقص نفسه يجب أن يدور ببطء كبير بالنسبة

للمجموعة الإحداثية المثبتة في الشمس. ودوران القطع الناقصة هو التأثير الجديد لنظرية النسبية العامة. وتعطينا النظرية مقدار هذه الظاهرة، ولكي تدرك مقدار صغر هذا التأثير وعدم احتمال استطاعتنا إدراكه في حالة الكواكب البعيدة عن الشمس يكفي أن نذكر أن دورة خسوف المشترى تستغرق ثلاثة ملايين سنة!

وقد كان انحراف حركة كوكب المشترى عن القطع الناقص معروفا قبل نشوء نظرية النسبية العامة، ولم يتمكن العلماء من وضع شرح له، بل على العكس نشأت النظرية العامة للنسبية دون التنبيه إلى هذا الموضوع الخاص، ولكن فيما بعد ظهرت من معادلات الجاذبية الجديدة، النتيجة الخاصة بدوران القطع الناقص أثناء حركة كوكب حول الشمس. وقد شرحت النظرية بنجاح انحراف الحركة عن قانون نيوتن في حالة المشترى.

وما زالت هناك نتيجة أخرى يمكننا استخلاصها من النظرية العامة للنسبية ومقارنتها بالتجربة. سبق أن رأينا أن ساعة موضوعة على الدائرة الكبيرة لقرص دائر تتميز بنظام توقيت مختلف عن نظام الساعة الموضوعة على الدائرة الصغيرة. وبالمثل ينتج من نظرية النسبية أن ساعة موضوعة على الشمس سيكون لها نظام توقيت يختلف عن نظام الساعة الموجود على سطح الأرض، لأن تأثير مجال الجاذبية أقوى بكثير على الشمس منه على الأرض.

وقد لاحظنا (في صفحتي ٧٢ – ٨٣) أن الصوديوم المتوهج يشع ضوءا أصفر متجانسا ذا طول موجي معين. وتكشف الذرة في هذا الإشعاع عن ناحية من حركتها الدورانية. إذ أن الذرة تمثل ساعة يكون طول الموجة المشعة هو وحدة تقديرها للزمن. وإذن طبقا لنظرية النسبية العامة يكون الطول الموجي للضوء الصادر من ذرة الصوديوم في سطح الشمس مثلا، أكبر قليلا من الطول الموجي الصادر من ذرة الصوديوم الموجود على سطح الأرض.

ويعتبر تحقيق نتائج النظرية العامة للنسبية بالمشاهدة مسألة معقدة، وغير منهية حتى الآن. وحيث أننا نهتم بالآراء الأساسية فإننا لا ننوي أن نتعمق كثيرا في هذا الموضوع بل يكفي أن نقول إن حكم التجربة يبدو حتى الآن مؤيدا للنتائج المستخلصة من نظرية النسبية العامة.

المجال والمادة:

رأينا فيما سبق سبب وكيفية فشل وجهة النظر الميكانيكية، فقد كان المستحيل شرح جميع الظواهر بفرض وجود قوى بسيطة بين جسيمات لا تتغير. وقد كان التوفيق حليف محاولاتنا الأولى للتعمق إلى أبعد من الوجهة الميكانيكية وكذلك أصابت معتقدات المجال نجاحا كبيرا في عالم الظواهر الكهرومغناطيسية، ثم تمت بعد ذلك صياغة القوانين البنائية للمجال الكهرومغناطيسي، وهي تربط بين الأحداث القريبة جدا من بعضها في المكان والزمان. وهذه القوانين تلائم بناء

النظرية الخاصة للنسبية حيث أنها لا تتغير بالنسبة لتحويلات لورنتز. وبعد ذلك صاغت النظرية العامة للنسبية قوانين الجاذبية. وهذه أيضا قوانين بنائية تصف مجال الجاذبية بين الجسيمات المادية. وقد كان من السهل تعميم معادلات ماكسويل بحيث يمكن استخدامها في أي مجموعة إحداثية، كما حدث لقوانين الجاذبية في النظرية العامة للنسبية.

ولدينا حقيقتان: المادة والمجال. وليس هناك أدنى شك في أننا لا يمكننا أن نتخيل في الوقت الحاضر أن علم الطبيعة مبني كله على أساس المادة، كما فعل علماء الطبيعة في أوائل القرن التاسع عشر. سنقبل الآن كلا الرأيين مؤقتا. هل يمكننا أن نعتبر المادة والمجال كحقيقة متميزتين ومختلفتين؟ فإذا كان لدينا جسيما صغيرا من المادة فإننا يمكننا البرهنة بطريقة سهلة أن هناك سطحا خاصا للجسيم، لا تكون مادة الجسم موجودة به، ولكن تظهر فيه آثار مجال جاذبيته. وخلال دراستنا اعتبرنا أن المنطقة التي تتحقق فيها قوانين المجال تنفصل تماما بطريقة فجائية عن المنطقة التي توجد بها المادة. ولكن ما هي الخواص الطبيعية التي تميز كلا من المادة والمجال؟

وقبل أن تظهر النظرية النسبية حاولنا الإجابة على هذا السؤال بالطريقة التالية: تتميز المادة بوجود كتلة لها في حين أنه ليست للمجال كتلة. ويمثل المجال طاقة في حين تمثل المادة كتلة. ولكننا نعرف مما سبق أن مثل هذه الإجابة تعتبر كافية بالنسبة للمعلومات الحديثة. تنبئنا نظرية النسبية أن المادة تمثل خزائن كبيرة من الطاقة، وأن هذه الطاقة

تمثل مادة. ولا يمكننا بهذه الطريقة التمييز ظاهريا بين المادة والمجال لأن التفرقة بين الكتلة والطاقة ليست ممكنة شكليا. ويتركز الجزء الأعظم من الطاقة في المادة، ولكن المجال المحيط بالجسم يمثل طاقة أيضا ولو أنها ذات قدر ضئيل نسبيا، وإذن يمكننا أن نقول: توجد المادة حينما يكون تركيز الطاقة عظيما، ويوجد المجال عندما يكون تركيز الطاقة ضئيلا. ولكن إذا كانت الحال كذلك فإن الفرق بين المادة والمجال هو مسألة تتوقف على مقدار الكمية الموجودة، ولا معنى لاعتبار المادة والمجال صورتين مختلفتين كثيرا عن بعضهما. ولا يمكننا أن نتخيل سطحا معينا يفصل المجال تماما عن المادة.

وتنشأ نفس الصعوبة في حالة الشحنة الكهربائية ومجالها، ويبدو المستحيل أن تعطي خواصا شكلية واضحة للتميز بين المادة والمجال أو الشحنة والمجال. وقوانيننا البنائية (أي قوانين مكسويل، وقوانين الجاذبية) لا تنطبق على حالات تركيز الطاقة الكبيرة جدا أو عند أماكن وجود مصادر المجال، أي الشحنات الكهربائية أو المادة. ولكن هل يمكننا تحويل معادلاتنا بحيث تصبح صحيحة في كل مكان حتى في المناطق التي تكون فيها الطاقة مركزة جدا؟

لا يمكننا بناء علم الطبيعة على أساس المادة فقط، ولكن الانقسام إلى مادة مجال، بعد إدراك التكافؤ بين الكتلة والطاقة، يعتبر شيئا مصطنعا وغير واضح تماما. فهل يمكننا نبذ فكرة المادة وبناء علم الطبيعة على أساس المجال؟ وأن يكون ما يؤثر على إحساساتنا كان ليس

في الحقيقة سوى تركيز عظيم جدا للطاقة في حيز صغير؟ ويمكننا اعتبار أن المادة هي تلك المناطق من الفضاء الذي يكون المجال ذا تركيز كبير فيها. ويمكننا بهذه الطريقة تكوين رأي فلسفي جديد يهدف إلى شرح جميع أحداث الطبيعة، بواسطة قوانين بنائية تتحقق دائما في كل مكان. ومن وجهة النظر هذه يكون "الحجر المقذوف في الهواء" مجالا متغيرا ذا شدة كبيرة يتحرك في الفضاء بسرعة الحجر. ولن يكون هناك مكان في علم الطبيعة الحديثة لكلا المجال والمادة، فالمجال هو الحقيقة الوحيدة. وتدفعنا إلى هذا الرأي الانتصارات العظيمة التي أحرزتها معتقدات المجال في علم الطبيعة وكذلك نجاحنا في صياغة قوانين الكهرباء والمغناطيسية والجاذبية على شكل قوانين بنائية، ثم التكافؤ بين المادة والطاقة، وستكون مشكلتنا الأخيرة هي تحوير قوانين المجال بشكل يجعلها تظل متحققة في المناطق التي تكون الطاقة فيها مركزة جدا.

ولكننا ننجح حتى الآن في بلوغ هذا الهدف بطريقة مقبولة ومرضية، ونترك للمستقبل الحكم فيما إذا كان في الإمكان تحقيق هذا الفرض. وحتى الآن يجب أن نستمر في فرض وجود المادة والمجال في جميع دراساتنا. ومازالت أمامنا مسائل أساسية؛ فنحن نعلم أن المادة مكونة من أنواع قليلة فقط من الجسيمات. كيف تتكون المادة في صورها المختلفة من هذه الجسيمات المختلفة؟ كيف تتفاعل هذه الجسيمات الصغيرة مع المجال؟ وللإجابة على هذه الأسئلة وضعت آراء جديدة في علم الطبيعة هي: معتقدات نظرية الكم.

تلخيص:

ظهر في عالم الطبيعة أعظم اختراع منذ عهد نيوتن وهو المجال، وقد احتاج العلماء إلى خيال علمي كبير ليدركوا أن المجال (الموجود في الفراغ بين الشحنات أو الجسيمات)، وليست الشحنات أو الجسيمات نفسها، أساسي جدا لوصف الظواهر الطبيعية. وقد نجحت فكرة المجال نجاحا كبيرا وأدت إلى صياغة معدلات ماكسويل التي تصف بناء المجال الكهرومغناطيسي والتي تتحكم في الظواهر الكهربائية والضوئية.

وتنشأ نظرية النسبية من مشاكل المجال؛ فقد دفعنا التناقض بين النظريات القديمة إلى إلحاق أوصاف جديدة لعالم المكان والزمان الذي تقع فيه جميع أحداث العالم الطبيعي. وقد تكونت نظرية النسبية على خطوتين، أدت الأولى منهما إلى ما نسميه بالنظرية الخاصة للنسبية التي تنطبق فقط على المجموعات الإحداثية القاصرة أي على المجموعات التي يتحقق فيها قانون القصور الذاتي كما وضعه نيوتن، وتبنى نظرية النسبية الخاصة على فرضين أساسيين وهما أن قوانين الطبيعة واحدة في جميع المجموعات الإحداثية المتحركة بانتظام بالنسبة لبعضهما، وأن لسرعة الضوء نفس القيمة.

ومن هذه الفروض التي أيدتها التجارب العلمية أمكننا استنتاج خواص القضبان والساعات المتحركة، وتعتبر أطوالها ونظام توقيتها بالنسبة لسرعتها. وقد غيرت نظرية النسبية قوانين الميكانيكا؛ فالقوانين القديمة لا تتحقق إذا اقتربت سرعة الجسم المتحرك من سرعة الضوء.

وقد أيدت التجربة القوانين الميكانيكية الجديدة لجسم متحرك كما صاغتها النظرية النسبية. وهناك نتيجة أخرى للنظرية الخاصة للنسبية وهي العلاقة بين الكتلة والطاقة. فالكتلة هي الطاقة وللطاقة كتلة، ويتحد قانونا بقاء المادة والطاقة في قانون واحد في النظرية النسبية هو قانون بقاء المادة والطاقة معا. وتذهب النظرية العامة للنسبة إلى أبعد من ذلك في تحليل خواص عالم المكان والزمان. ولا تنحصر هذه النظرية في المجموعات الإحداثية القاصرة فقط، فهي تدرس مشكلة الجاذبية وتضع قوانين بنائية جديدة لمجال الجاذبية.

وهي تدفعنا إلى تحليل الدور الذي تلعبه الهندسة في وصف العالم الطبيعي. وهي تعتبر تساوي كتلة الجاذبية مع الكتلة القاصرة شيئا أساسيا وليس فقط مجرد صدفة، كما كانت الحال في الميكانيكا الكلاسيكية. وتختلف النتائج العملية للنظرية العامة للنسبية اختلافا بسيطا فقط عن نتائج الميكانيكا الكلاسيكية، وقد تأيدت هذه النتائج مما أمكننا الحصول عليه من النتائج العملية، ولكن قوة النظرية تكمن في بساطة فروضها وخلوها من التناقض.

وتؤكد نظرية النسبية أهمية فكرة المجال في علم الطبيعة، ولكننا لم ننجح بعد في صياغة علم الطبيعة بأكمله على صورة مجالية صرفة، ولذا فإنه يجب علينا الآن أن نفرض وجود المجال والمادة على حد سواء.

الباب الرابع

الكمات

الاتصال وعدم الاتصال:

لنفرض أن أمامنا خريطة لمدينة نيويورك وضواحيها ودعنا نتساءل عن أي النقاط على هذه الخريطة يمكن الوصول إليها بالقطار؟.. ولنسجل هذه النقاط على الخريطة بعد العثور عليها في دليل القطارات. ولنغير الآن سؤالنا إلى الصيغة: أي النقاط يمكننا الوصول إليها بالسيارة ؟ فإذا رسمنا خطوطا على الخريطة تمثل كل الطرق الممتدة من نيويورك فإننا يمكننا عمليا الوصول بالسيارة إلى أي نقطة على هذه الطرق. وعندنا في كلتا الحالتين مجموعتان من النقاط، في الحالة الأولى نجد أن النقاط تنفصل عن بعضها وتعين محطات السكة الحديدة المختلفة، وفى الحالة الثانية نجدها تقع على كل النقاط التي تمثل الطرق.

وسيكون سؤالنا الثاني عن أبعاد كل من هذه النقط عن نيويورك أو على الأدق عن نقطة محددة في المدينة. سيكون لدينا في الحالة الأولى بضعة أرقام متناسبة مع النقاط المحددة على الخريطة. وسنرى أن هذه الأرقام تتغير بغير انتظام ولكن على وثبات أو قفزات محدودة. ويمكننا القول إذن بأن أبعاد الأماكن التي يمكن الوصول إليها بالقطار تتغير بطريقة غير متصلة، أما في حالة الأماكن التي يمكن الوصول إليها بالسيارة فإن هذه الأبعاد تتغير بكميات يمكن تصغيرها كيفما نريد، أي أن هذا التغير يمكن أن يحدث بطريقة ليست كذلك في حالة القطار.

وقد يحدث لإنتاج منجم فحم أن يتغير تغيرا متصلا لأن كمية الفحم الناتج في الإمكان زيادتها أو تقليلها بخطوات صغيرة. ولكن عدد

عمال المنجم المستخدم يتغير تغيرا غير متصل، إذا أنه من اللغو أن نقول "ازداد عدد العمال منذ أمس بمقدار ٣.٧٨٣". وإذا سئل رجل عن مقدار ما يحمل من النقود فإنه يمكنه الإجابة بعدد يحتوي على رقمين عشريين. ويمكن تغيير مبلغ من المال على قفزات فقط بطريقة غير متصلة. ففي أمريكا أصغر وحدة للعملة أو ما يمكننا تسميته الكم الأولي للعملية الأمريكية هو سنت واحد. والكم الأولي للعملة الإنجليزية هو الفارذنج وهو يساوي نصف قيمة الكم الأولي الأمريكي. فلدينا الآن إذن مثل لكمين أوليين يمكننا مقارنة قيمتيهما. ونسبة قيمتيهما لها معنى محدد إذ أن أحد الكمين يساوي ضعف قيمة الآخر.

ويمكن القول بأن بعض الكميات تتغير بطريقة متصلة وأخرى تتغير بطريقة غير متصلة، على خطوات لا يمكن تصغيرها. وهذه الكميات غير القابلة للقسمة تسمى بالكمات الأولية للمقادير السابق ذكرها.

ويمكننا أن نزن كميات كبيرة من الرمال، ونعتبرها متصلة رغم علمنا بتركيبها المحبب. ولكن إذا أصبحت الرمال ذات قيمة عظيمة واستعملت موازين دقيقة لوزنها فإنه يتحتم علينا أن نعتبر أن الكتلة تتغير بمضاعفات لكمية ثابتة هي الحبة. وبذلك يصبح وزن تلك الحبة هو كمنا الأولي للكتلة. ونرى من هذا كيف أن خاصية التقطع أو الانفصال لكمية – كانت لا تزال تعتبر متصلة – يمكن تأكيدها بزيادة حساسية مقاييسنا.

وإذا كان علينا أن نصف الفكرة الأساسية لنظرية الكم في جملة واحدة لوجب علينا أن نقول: إن بعض الكميات الطبيعية التي كانت لا تزال تعتبر متصلة تتكون من كمات أولية.

ومدى الحقائق التي تشملها نظرية الكم فسيح جدا، وقد اكتشفت هذه الحقائق بواسطة الأجهزة الدقيقة الصنع التي استخدمت في التجارب الحديثة، ومع أننا لن نستطيع وصف أو حتى مجرد الكلام عن التجارب الأساسية، فإنه لا مناص لنا من ذكر نتائج هذه التجارب حيث أن هدفنا هو شرح الآراء الأساسية الموجودة فقط.

الكمات الأولية الموجودة للمادة والكهرباء:

تنبئنا نظرية الحركة أن جميع العناصر تتكون من جزيئات؛ فإذا اعتبرنا أسهل الحالات، باختصار أخف عنصر وهو الإيدروجين، فإننا نعلم كيف أدت دراسة "الحركة البراونية" إلى تقدير كتلة جزء واحد من الإيدروجين (صفحة ٤٧)، وهي: **٣٣** ... . و . جراما.

وهذا يدفعنا إلى أن نعتقد أن الكتلة غير متصلة حيث أن كتلة أي كمية من الأيدروجين يمكن أن تتغير فقط بعدد كامل من مقادير صغيرة كل منها يتناسب مع كتلة جزء الأيدروجين. ولكن العمليات الكيميائية ترينا أن جزيء الأيدروجين يمكن تقسيمه إلى قسمين، أو بعبارة أخرى إن الأيدروجين يتكون من ذرتين. وفي العمليات الكيميائية تلعب الذرة – لا

الجزيء – دور الكم الأولي. وبقسمة العدد السابق على اثنين، تحمل على كتلة ذرة الأيدروجين وهي حوالي: ١٧ .... و. جرام .

وإذن فالكتلة كمية غير متصلة، ولكننا طبعا لا نعير هذه الحقيقة أي اهتمام عند تقدير الوزن. وحتى أدق المقاييس أبعد ما تكون عن الوصول إلى درجة الدقة اللازمة لاكتشاف عدم الاتصال في تغير الكتلة.

لنعد الآن للتكلم عن حقيقة مألوفة، لنفرض أن لدينا سلكا متصلا بمصدر تيار كهربائي حيث يسير التيار خلاله من النقطة الأعلى إلى الأقل جهدا. ولعلنا نذكر أن كثيرا من الحقائق العلمية قد أمكن تفسيرها بالنظرية البسيطة التي تفرض وجود مانع كهربائي يسير خلال السلك. ولعلنا نذكر أيضا أن قرارنا (صفحة ٥٧) الخاص بالتساؤل عما إذا كان المائع الموجب بفيض من الجهد المرتفع إلى المنخفض أو أن المائع السالب يفيض من الجهد المنخفض إلى المرتفع كان مجرد اصطلاح.

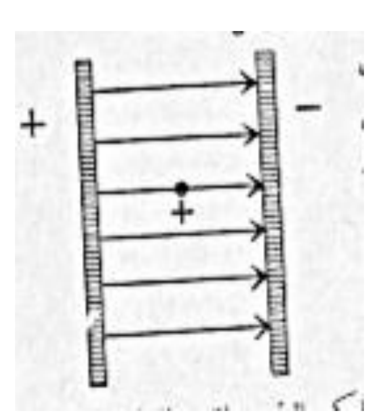
لنترك الآن جانبا كل ما طرأ من تغيير وتحسين كنتيجة لظهور معتقدات المجال وتقبل جدلا الصورة البسيطة الخاصة بفرض وجود المائع الكهربائي. وحتى عند أخذنا بفكرة الموائع البسيطة فما تزال هناك بعض أسئلة تنتظر الجواب، فكما نفهم من اللفظ "مائع" اعتبرت الكهربائية منذ فجر العلم كشيء له صفة الاتصال، وفي الاستطاعة طبقا للصور القديمة تغيير كمية الشحنة بمقادير صغيرة اختيارية ولكن لم يكن

هناك داع لفرض كمات كهربائية أولية. ثم أدى نجاح نظرية الحركة بعد ذلك أن تتساءل هل توجد كمات أولية للموائع الكهربائية؟ والسؤال الآخر الذي مازال ينتظر الجواب هو: هل يتكون التيار من فيضان المائع الموجب أو السالب أو كليهما؟ وللحصول على أجوبة لهذه الأسئلة لابد من أن نطرد المائع الكهربائي من السلك وندفعه إلى الحركة في الفضاء أي أن نستخلصه من براثن المادة ثم ندرس خواصه التي يجب أن تظهر جلية حينئذ، وقد أجريت تجارب عديدة مثل هذه في القرن التاسع عشر، وقبل أن نشرح فكرة إحدى هذه التجارب العملية سنذكر النتائج أولا: يتميز المائع الكهربائي الذي يمر خلال السلك بشحنة سالبة، وإذن فهو يتجه من النقطة الأقل جهدا إلى الأعلى جهدا.

ولو أننا كنا قد توصلنا إلى هذه النتيجة في بادئ الأمر عندما كانت نظرية الموائع الكهربائية لا تزال في طور التكوين لغيرنا بلا شك مصطلحاتنا، ولسمينا كهربائية القضيب المطاط بالكهربائية الموجبة وكهربائية قضيب الزجاج بالسالبة، وكان يصبح حينئذ من الأوفق أن نعتبر المائع السالب موجبا. وعلينا الآن أن نتحمل تبعة هذا الخطأ الناتج من عدم إصابة حدسنا. وسؤالنا الثاني المهم هو عما إذا كان تكوين الكهربائية السالبة "محببا"، أي عما إذا كانت أو لم تكن مكونة من كمات كهربائية؟ وقد أثبتت بعض تجارب منفصلة بشكل لا يقبل الشك وجود هذه الوحدة الأولية للكهرباء السالبة. وإذن يتكون المائع الكهربائي السالب من حبيبات، تماما، كما يتكون الشاطئ من حبيبات

الرمال، أو المنزل من اللبنات وتم إثبات ذلك على يد السير ج. ج. تومسون منذ أكثر من خمسين عاما.

وتسمى هذه الوحدات الأولية للكهرباء السالبة بالإلكترونات. وإذن تتكون كل شحنة كهربائية سالبة من عدد كبير من تلك الشحنات الأولية الممثلة بالإلكترونات (أو الكهارب). ويمكن للشحنة السالبة أن تتغير مثل الكتلة تغيرا غير متصل. وتبلغ الشحنة الكهربائية حدا من الصغر يجعلنا في كثير من الأحوال نعتبر الشحنات عموما – ربما يكون ذلك من الأوفق – كميات متصلة، وهكذا أدخلت نظريات الذرة والكهارب إلى العلوم فكرة الكميات الطبيعية غير المتصلة التي يمكن أن تتغير فقط على شكل دفعات.



لنتصور الآن لوحين معدنيين متوازيين موضوعين في مكان مفرغ من الهواء، يحمل أحدهما شحنة موجبة والآخر شحنة سالبة. فإذا قربنا جسيما صغيرا موجب الشحنة من اللوحين، فإنه ينجذب إلى اللوح السالب الكهربي ويطرد بعيدا عن الآخر. وإذن تتجه خطوط القوى الكهربائية من اللوح السالب إلى اللوح الموجب الكهربي. وسيكون اتجاه القوة المؤثرة على جسم سالب التكهرب مضادا للاتجاه السابق. وإذا كان اللوحان كبيرين بدرجة كافية فإن كثافة هذه الخطوط ستكون موزعة بانتظام بينهما

في كل مكان، ولن يهمنا أين نضع جسم الاختبار لأن القوة – وبالتالي كثافة هذه الخطوط – ستكون متماثلة. وإذا وجدت كهارب بين هذين اللوحين فإنها تتحرك مثل حركة نقط المطر في مجال الأرض المغناطيسي، أي أنها تتحرك موازية لبعضها متجهة من اللوح السالب إلى اللوح الموجب. وهناك طرق عملية كثيرة لدفع جمع من الإلكترونات إلى مجال يوجد بين اتجاهاتهم. ومن أسهل هذه الطرق إحضار سلك مسخن بيت لوحين مشحونين، لأن خطوط قوى المجال الخارجي توجه الكهارب المنبعثة من السلك الساخن. وتبنى صمامات الراديو العادية على نفس هذه الفكرة.

وهناك تجارب رائعة عديدة سبق إجراؤها على سيال الكهارب، درست فيها وبحثت بالتفصيل تغيرات اتجاهاتها في مختلف المجالات الكهربائية والمغناطيسية الخارجية، وأصبح في الإمكان أيضا عزل كهرب واحد وتعيين شحنته الأولية، وكتلته، أي مقاومته الذاتية لفعل مجال خارجي. وسنذكر هنا فقط كتلة الإلكترون، إذ قد ظهر أنها أصغر من ذرة الإيدروجين عشرين ألف مرة. وهكذا نرى أن كتلة ذرة الأيدروجين الصغيرة تظهر كبيرة بالنسبة لكتلة الكهرب. وتستلزم نظريات المجال الطبيعية أن تكون كتلة الكهرب أو بعبارة أخرى طاقته ناشئة عن طاقة مجاله نفسه، الذي تبلغ شدته أقصاها داخل كرة صغيرة جدا، وتصبح مهملة إذا بعدنا عن مركز الكهرب.

وقد سبق لنا أن ذكرنا أن ذرة أي عنصر ما هي إلا أصغر كماته الأولية، وقد ظل العلماء مدة طويلة مؤمنين بهذا الرأي، ولكنه الآن أصبح باطلا، فقد أظهر العلم نظريات حديثة أوضحت بطلان المعتقدات القديمة. ولا يوجد في علم الطبيعة الآن من النظريات ما هو مبني على أسس متينة من الحقائق أكثر من تركيب الذرة المعقدة؛ فقد تنبه العلماء أولا إلى أن الكهرب وهو الكم الأولي للكهربائية السالبة، هو أحد مكونات الذرة، أي إحدى اللبنات الأولية التي تبنى منها جميع الأجسام. وقد ذكرنا مثال السلك الساخن وانبعاث الكهارب منه، وليس هذا سوى مثال واحد من أمثلة عديدة لاستخلاص هذه الكهارب من المادة. وهذا المثال – الذي يوضح لنا ارتباط تركيب المادة بتركيب الكهرباء – ظهر على صورة لا تقبل الشك من حقائق عملية كثيرة جدا.

ومن السهل نسبيا استخلاص بعض الكهارب التي تدخل في تركيب الذرة بالحرارة أو بطريقة أخرى كقذف الذرات بقذائف من كهارب أخرى خارجية. لنفرض أننا أدخلنا سلكا معدنيا لدرجة الاحمرار في جو من الأيدروجين المخلخل. ستنبعث الكهارب من السلك وفي جميع الاتجاهات وتكتسب سرعا بتأثير مجال كهربائي خارجي. وستزداد سرعة الكهرب تماما كما يحدث لحجر ساقط في مجال الجاذبية الأرضية. ويمكننا بهذه الطريقة الحصول على أشعة من الكهارب مندفعة بسرعة معينة في اتجاه معين، وقد أصبح الآن في إمكاننا أن نجعل الكهارب تتحرك بسرع تقترب من سرعة الضوء بتعريضها لتأثير مجال قوي جدا. ماذا يحدث إذن عندما يسقط شعاع من الكهارب، ذات سرعة معينة،

إلى جزيئات الأيدروجين "المخلخل"؟.. لن يؤدي تصادم كهرب متحرك بسرعة فائقة مع جزيء الأيدروجين إلى انشطاره إلى ذرتين فقط، ولكنه سيطرد كهربا آخر من إحدى هاتين الذرتين.

دعنا نسلم بالحقيقة القائلة بأن الكهارب هي بعض مكونات المادة، وإذن لن تصبح الذرة التي فقدت كهربا واحدا بلا شحنة كهربائية كما كانت قبل أن تفقد الكهرب. وذلك لأنها فقدت شحنة كهربائية أولية سالبة وإذن يجب أن يحمل ما بقي من الذرة شحنة موجبة. ولما كانت كتلة الكهرب أصغر بكثير جدا من كتلة أخف الذرات فإننا نستطيع القول بأن معظم وزن الذرة ليس ممثلا في الكهارب ولكن في الجسيمات الأولية الأخرى المتبقية والتي تفوق كتلتها بكثير كتلة الكهرب، والتي سنسميها بنواة الذرة.

وقد استحدث علم الطبيعة التجريبية الحديث طرقا لتحطيم نواة الذرة وتغيير ذرات عنصر ما إلى ذرات عنصر آخر ولاستخلاص الجسيمات الأولية التي تتكون منها النواة ذاتها. وهذا الفصل من علم الطبيعة والمسمى "بطبيعة النوتة" والذي قام فيه رذرفورد بدور كبير، يعتبر شائقا جدا من الناحية العملية. ولكننا مازلنا حتى الآن في حاجة إلى نظرية بسيطة في أسسها تربط بين الحقائق العملية في عالم الطبيعة التواوية. وبما أننا معنيون في هذه الصفحات فقط بدراسة المعتقدات الطبيعية العامة فإننا سنترك هذا الفصل رغما عن أهميته الكبيرة في علم الطبيعة الحديث.

كمات الضوء:

إذا تصورنا حائطا مقاما على طول الشاطئ، فإن أمواج البحر ستأخذ في مهاجمة الحائط ملحقة بسيطة بعض البلل، ثم ما تلبث أن تريد مفسحة الطريق لأفواج الأمواج القادمة التي ستواصل الهجوم على الحائط مزيلة جزءا من المصيص الذي يكسو سطحه، وبذلك يقل وزن الحائط، ويمكننا أن نتساءل عن القدر الذي سيفقده الحائط في عام مثلا. لنتخيل الآن طريقة أخرى لإنقاص وزن الحائط بنفس القدر، بأن نطلق الرصاص عليها محدثين بها ثقوبا عديدة. سيقل وزن الحائط بهذه الطريقة كما قل وزن الحالة الأولى؟ ولكن مظهر الحائط ينبئنا ما إذا كان النقص ناتجا عن الفعل المستمر لأمواج البحر أم عن سيل الرصاص المتقطع. وسيكون من المفيد لكي نفهم مما سنتكلم عنه من الظواهر الطبيعية أن ندرك الفرق بين أمواج البحر وسيل الرصاص المنطلق.

سبق أن تكلمنا عن انطلاق الكهارب من السلك الساخن. وسنذكر هنا طريقة أخرى لاستخلاص الكهارب من المعدن بتسليط أشعة متجانسة مثل الأشعة البنفسجية – التي هي عبارة عن أشعة ذات طول موجي معين – على سطحه، فتنبعث منه الكهارب بفعل تلك الأشعة ذات طول موجى معين – على سطحه، فتنبعث منه الكهارب بفعل تلك الأشعة التي تقتنصها من المعدن وتبعثها أفواجا متتالية متحركة بسرعة معينة. ويمكننا أن تقول من وجهة نظر قاعدة الطاقة، أن طاقة الضوء تتحول جزئيا إلى طاقة حركة للكهارب المطرودة. ونستطيع بفضل

التجارب العملية الحديثة معرفة هذه الرصاصات وتعيين سرعتها وبالتالي طاقتها. ويسمى استخلاص الكهارب بالضوء الساقط على المعدن: الظاهرة الكهروضوئية.

وقد استخدمنا في التجربة السابقة أشعة ضوئية متجانسة ذات شدة معلومة، ويجب علينا الآن – كما هي العادة في جميع التجارب العملية – أن نغير ظروف التجربة لترى ما إذا كان لهذا أثر في النتائج التي حصلنا عليها.

لنبدأ أولا بتغيير شدة الضوء البنفسجي المتجانس الساقط على لوح معدني، ولندرس الكيفية التي تتوقف بها طاقة الكهارب المنبعثة على شدة الضوء الساقط. لنحاول أيضا أن نعثر على الإجابة عن طريق المنطق العلمي بدلا من التجربة. يمكننا القول بأن قسما من طاقة الإشعاع يتحول إلى طاقة حركة للكهارب في الظاهرة الكهروضوئية. فإذا أسقطنا على المعدن أشعة لها نفس طول الموجة ولكن من مصدر أقوى فإن أسقطنا على المعدن أشعة لها نفس طول الموجة، ولكن من مصدر أقوى فإن طاقة الكهارب المنبعثة ستكون أكبر لأن الإشعاع سيكون أغنى بالطاقة. وإذن يكون من الطبيعي أن نتوقع ازدياد سرعة الكهارب المنبعثة بازدياد شدة الضوء. ولكن عند إجراء هذه التجربة عمليا حصلنا – لدهشتنا – على نتيجة تتعارض مع استنتاجنا أيضا. وهكذا نرى أن قوانين الطبيعة لا تسير وفق أهوائنا، وقد وجدنا الآن تجربة حكمت على الأسس التي بنينا عليها نظريتنا بالفشل، وكانت نتيجة هذه التجربة مدعاة لأشد

العجب من وجهة نظر النظرية الموجية. إذ قد أظهرت أن الكهارب المنبعثة لها نفس السرعة (نفس الطاقة) التي لا تتأثر بزيادة شدة الضوء الساقط، ولم يكن في الاستطاعة التنبؤ بهذه النتيجة على أساس النظرية الموجية. وهكذا نرى هنا أيضا كيف يؤدي التعارض بين إحدى النظريات القديمة والتجربة إلى ظهور نظرية جديدة.

لنتعمد أن نكون ظالمين للنظريات الموجبة غامطين لها أفضالها العظيمة، فنتناسى نصرها الشامل في شرح انحناء الضوء حول العوائق الصغيرة جدا، ولنحصر الآن اهتمامنا بالظاهرة الكهروضوئية، ولنحاول إيجاد نظرية تضع لنا شرحا مقبولا لهذه الظاهرة. فمن المقطوع به أننا لا يمكننا أن نستنتج من النظرية الموجبة عدم توقف طاقة الكهارب المطرودة من سطح المعدن على شدة الضوء الساقط. فلنبحث الآن عن نظرية أخرى، لنرجع البصر مرة أخرى إلى نظرية الجسيمات لنيوتن التي نجحت في شرح كثير من ظواهر الضوء المألوفة وفشلت في شرح انثناء الأشعة الضوئية. وهي الظاهرة التي ستنعدم عدم ذكرها ونتجاهل نجاح النظرية الموجبة في هذا الشأن. وفي عهد نيوتن لم تكن حقيقة الطاقة قد وضحت بعد، فكانت جسيمات الضوء في رأيه لا وزن لها، ولكن عندما ظهرت نظريات الطاقة فيما بعد وأدرك الجميع أن للضوء طاقة يحملها معه لم يفكر أحد في تطبيق هذه المعتقدات على نظرية الجسيمات الضوئية. وبذلك ظلت نظرية نيوتن في عداد الأموات ولم يفكر أحد جديا في بعثها إلى الحياة حتى أوائل قرننا الحالي.

ولكي نحتفظ بالفكرة الأساسية في نظرية نيوتن يجب أن نفرض أن الضوء المتجانس مكون من حبيبات ضوئية ثم نستبدل بجسيمات الضوء القديمة كمات ضوئية سنطلق عليها إسم الفوتونات – وهي عبارة عن ذرات طاقة صغيرة تتحرك في الفضاء الخالي بسرعة الضوء. وإحياء نظرية نيوتن على هذه الصورة يؤدي بنا إلى نظرية الكم للضوء، فليست المادة والكهرباء فقط بل الطاقة الإشعاعية أيضا، تتميز جميعها بتركيب حبيبي، أي أنها مركبة من كمات ضوئية، وبذلك يصبح لدينا كمات طاقة فضلا عن كمات المادة والكهرباء.

وقد كان بلانك أول من استحدث كمات الطاقة في مستهل القرن الحالي لكي يتمكن من شرح بعض ظواهر طبيعية أكثر تعقيدا من الظواهر الكهروضوئية. ولكن الظاهرة الكهروضوئية توضح لنا بشكل قاطع وسهل ضرورة تغيير معتقداتنا القديمة.

ولا حاجة بنا لكي نقول أن نظرية الكم للضوء تفسر على الفور الظاهرة الكهروضوئية، فعندما يسقط سيل من الفوتونات على سطح معدني فإن التفاعل بين الأشعة والمادة عبارة عن مجموعة كبيرة جدا من عمليات فردية، يصطدم فيها الفوتون بالذرة فيقتطع منها كهربا يقذف به إلى الخارج. وحيث أن جميع هذه العمليات الفردية متشابهة فإن جميع الكهارب المنبعثة سيكون لها نفس الطاقة في كل حالة. وليست زيادة شدة الضوء في هذه النظرية الجديدة سوى زيادة عدد الفوتونات الساقطة وينتج عن ذلك طبعا زيادة عدد الكهارب المنبعثة ولكن يحتفظ كل

كهرب بنفس طاقته السابقة دون أن يعتريها أي تغيير. ويثبت لنا هذا أن النظرية الجديدة تتفق تماما مع التجارب العملية.

ماذا يحدث عندما تسقط أشعة متجانسة ذات لون آخر، أحمر مثلا، بدلا من البنفسجي على سطح معدني؟ لنترك التجارب العملية تتولى الإجابة على هذا السؤال، ويجب حينئذ أن نقيس طاقة الكهارب المنبعثة ونقارنها بطاقة الكهارب الناتجة من استخدام الضوء البنفسجي. وقد وجد بالتجربة أن طاقة الكهرباء المنبعثة بفعل الضوء الأحمر أقل من طاقة الكهرب المنبعث بفعل الضوء البنفسجي، وهذا يدلنا على أن طاقة كمات الضوء تختلف باختلاف الألوان. فطاقة الفوتونات المكونة للون الأحمر تبلغ نصف طاقته تلك المكونة للون البنفسجي، أو بعبارة أدق، تقل طاقة الكمات الضوئية المكونة للون متجانس بازدياد أطوال موجات الضوء. وهنا فرق أساسي بين كمات الطاقة وكمات الكهرباء، إذ أن كمات الضوء تختلف باختلاف طول الموجة في حين أن كمات الكهرباء ثابتة لا تتغير. وإذا كان لا بد من استخدام أحد الأمثلة السابقة فيمكننا تشبيه كمات الضوء بأصغر وحدات العملة التي تختلف باختلاف كل دولة.

دعنا نستمر في تجاهل النظرية الموجبة للضوء ونفرض أن الضوء له تركيب حبيبي، أي يتكون من كمات ضوئية – فوتونات – تتحرك في الفضاء بسرعة الضوء. وإذن يأخذ الضوء صورة سيل من الفوتونات أو الكمات الأولية لطاقة الضوء، وإذا نبذنا النظرية الموجية فإن فكرة الطول

الموجي تختفي. ولكن ما الذي يحل محله؟ هي طاقة كمات الضوء! وبذلك يمكننا ترجمة العبارات التي تحتوي على مصطلحات النظرية الموجية إلى أخرى تستخدم فيها مصطلحات النظرية الكمية للإشعاع؛ فمثلا:

في لغة النظرية الموجية: يتميز الضوء المتجانس بطول موجي معين، فطول موجة الضوء الأحمر الموجود في نهاية الطيف يبلغ ضعف طول موجة الضوء البنفسجي الموجود في طرفه الآخر.

في لغة النظرية الكمية: يحتوي الضوء المتجانس على فوتونات ذات طاقة معينة، فطاقة الفوتون المكون للون نهاية الطيف الأحمر تبلغ نصف طاقة ذلك المكون لطرف الطيف البنفسجي.

ويمكننا تلخيص الموقف الحالي كما يلي: هناك من الظواهر الطبيعة ما يمكن شرحها بواسطة النظرية الموجية، لا بواسطة نظرية الكم كظاهرة انحناء الضوء حول العوائق الصغيرة. وهناك أيضا بعض ظواهر أخرى مثل انتشار الضوء في خطوط مستقيمة يمكن شرحها سواء بنظرية الكم أم بالنظرية الموجبة.

ولكن ما هي حقيقة الضوء؟ أهو موجات أم سيل من الفوتونات؟.. وقد سبق أن وضعنا سؤالا مماثلا لهذا حينما تساءلنا: هل الضوء موجات أم سيل من جسيمات ضوئية؟ وكان لدينا حينئذ من الأسباب ما دفعنا إلى نبذ نظرية الجسيمات الضوئية وقبول النظرية الموجية التي شرحت جميع

الظواهر الطبيعية. ولكن الموضع هنا أكثر تعقيدا، فليس لدينا من الدلائل ما يشير إلى إمكان شرح جميع الظواهر الطبيعة باختبار إحدى هاتين النظريتين. ويبدو لنا أنه لا مفر من استخدام إحدى هاتين النظريتين في حالات معينة والأخرى في حالات مختلفة، واستخدام أي منها في حالات ثالثة. وها نحن نواجه صعوبة من نوع جديدة فلدينا صورتان طبيعيتان متعارضتان لا تكفي إحداهما لشرح جميع الظواهر الضوئية ولكنهما معا تنجحان في ذلك.

فكيف يمكننا أن نجمع بين هاتين الصورتين؟.. كيف يمكننا فهم هذه الصورة المتعارضة عن الضوء؟ وليس من السهل حل هذه المعضلة، وها نحن نواجه الآن مرة أخرى معضلة أساسية. لنفرض الآن أننا تتبع نظرية الفوتونات ولنحاول بمساعدتها أن تفهم الحقائق التي تمكنت النظرية الموجية من شرحها. وبهذه الطريقة سنتكلم عن الصعاب التي تجعل النظريتين تبدوان لأول وهلة كأنهما متنافرتان.

ولعلنا مازلنا نذكر أن شعاعا متجانسا من الضوء يمر خلال فتحة صغيرة في حجم رأس الدبوس يحدث على حاجز صغير حلقات مضيئة ومظلمة على التوالي (صفحة ٨٣). كيف يمكننا شرح هذه الظاهرة على أساس نظرية الكم الضوئية، تاركين النظرية الموجية جانبا؟ لنفرض أن الفوتونات أخذت تمر من الثقب الصغير فيمكننا توقع إضاءة الحاجز الموجود خلف الثقب إذا مرت الفوتونات خلاله أو إظلامه إذا لم تمر. ولكن بدلا ذلك فإننا نشاهد حلقات مضيئة وأخرى معتمة. ويمكننا أن

نحاول شرحها كما يلي: يحتمل أن يكون هناك تفاعل ما بين حافة الثقب الصغير والفوتونات مما يتسبب عنه تكون حلقات الحيود. ويصعب علينا قبول هذه العبارة كشرح واف للغرض، بل إنها – على أحسن الفروض – قد تصلح لكي تكون أساسا لنظرية مستقلة لشرح الحيود بتفاعل بين المادة والفوتونات. وحتى هذا الأمل الضعيف تقضي عليه دراستنا السابقة لمثل عملي آخر. لنفرض أن لدينا ثقبين صغيرين يمر خلالهما ضوء متجانس فيحدث خطوطا مضيئة وأخرى معتمة على الحاجز الصغير الواقع خلف الثقبين. كيف نستطيع شرح هذه الظاهرة على أساس نظرية الكم الضوئية؟ يحتمل أن يمر فوتون من أحد الثقبين، فإذا كان إحدى فوتونات الأشعة المتجانسة يمثل كما ضوئيا أوليا فإن من العسير علينا تصور انقسامه ومروره من كلا الثقبين. وحتى في هذه الحالة يجب أن تؤدي الظاهرة إلى تكوين حلقات مضيئة ومعتمة لا إلى خطوط مضيئة وأخرى مظلمة كما يحدث. فكيف أدى وجود الثقب الآخر إلى وجود هذه الظاهرة؟ لعل الثقب الذي لم يمر الضوء خلاله قد أثر على الحلقات فجعلها خطوطا!! إذا كان الفوتون شبيها بالجسيم المادي في الطبيعة الكلاسيكية فإنه يجب أن يمر خلال أحد الثقبين فقط. وفي هذه الحالة يشق علينا جدا فهم ظاهرة الحيود.

يضطرنا العلم دائما إلى وضع آراء جديدة ونظريات حديثة لتخطي حواجز المتناقضات التي تعترض طريق التقدم العلمي وقد تولدت الأسس والآراء العلمية من التناحر بين الحقائق ومحاولاتنا لفهمها. وتجابهنا الآن معضلة يلزم لحلها وضع مبادئ جديدة. وقبل أن نذكر محاولات علم

الطبيعة الحديث لشرح التناقض بين الصورتين الكمية والموجية للضوء، سنبين أن هذه المعضلة تعترض طريقنا أيضا عند دراستنا لكمات المادة بدلا من كمات الضوء.

الطيف الضوئي:

نعلم مما سبق أن جميع المواد الموجودة في الطبيعة تتكون من بضعة أنواع من الجسيمات الأولية. وقد كانت الكهارب أول ما اكتشف من هذه الجسيمات. ولكن الكهارب هي أيضا الكمات الأولية للكهرباء السالبة. وقد سبق أن رأينا كيف تضطرنا بعض الظواهر الطبيعية إلى أن نفرض أن الضوء مكون من كمات ضوئية أولية تختلف باختلاف أطوال الموجات. ويجدر بنا قبل أن نسترسل في دراستنا أن نناقش بعض الظواهر التي تلعب فيها المادة والإشعاع دورين أساسيين.

يمكننا تحليل الأشعة الشمسية إلى مركباتها بواسطة منشور زجاجي، ولذا يمكننا الحصول على طيف الشمس المستمر، وسنحصل بذلك على كل أطوال الأمواج المحصورة بين طرفي الطيف المرئي. لنعتبر مثلا آخر. سبق أن أشرنا إلى أن معدن الصوديوم المتوهج يبعث بإشعاعات متجانسة، ذات لون واحد أو طول موجي واحد. فإذا وضعنا الصوديوم المتوهج أمام منشور زجاجي فإننا نرى خطا واحدا ذا لون أصفر. وعلى العموم إذا وضعنا جسما مشعا أمام منشور فإن الضوء الصادر منه يتحلل إلى مركباته مبينا خصائص طيف الجسم المشع.

ويؤدي مرور الكهرباء في أنبوبة مليئة بالغاز إلى تولد ضوء كالذي تشاهده منبعثا من أنابيب النيون المستخدمة في الإعلانات المضيئة. لنضع مثلا هذه الأنبوبة أمام المطياف الذي هو عبارة عن جهاز يقوم بعمل المنشور ولكنه أكثر حساسية وأعظم دقة فهو يرد الضوء إلى مركباته التي يتكون منها أي يحلله. فإذا نظرنا خلال المطياف إلى أشعة الشمس فإننا نشاهد طيفا مستمرا تمثل فيه جميع الأطوال الموجية، أما إذا كان المصدر الضوئي ناشئا عن مرور تيار كهربي خلال غاز مخلخل فإن الطيف يصبح ذا خصائص مختلفة في هذه الحالة. فإننا نشاهد، بدلا من الطيف المستمر ذي الألوان العديدة الموجودة في طيف الشمس، خطوطا دقيقة مضيئة منفصلة عن بعضها بمناطق مظلمة. ويشير كل خط دقيق إلى لون معين أو إلى طول موجي بلغة النظرية الموجية. فإذا شاهدنا عشرين خطا من خطوط الطيف مثلا فإننا سنرمز لكل منها برقم يشير إلى طول موجته، فبذلك تتميز أبخرة العناصر المختلفة بمجموعات مختلفة من الخطوط أي بمجموعات مختلفة من الأرقام التي ترمز لأطوال الأمواج المكونة للطيف الضوئي المشع. ولا يمكن أن يكون لعنصرين نفس مجموعة الخطوط في طيفيهما المميزين، كما أنه لا يمكن أن يكون لشخصين نفس بصمات الأصابع. وعندما أخذ علماء الطبيعة في اكتشاف هذه المجموعات الخطية لجميع العناصر أمكنهم اكتشاف وجود علاقات بين هذه الخطوط وأصبح بذلك في الإمكان الاستعاضة بمعادلة رياضية بسيطة عن أعمدة طويلة من الأرقام على أطوال موجات الطيف المختلفة.

ويمكننا نقل هذا الكلام إلى لغة الفوتونات؛ فهذه الخطوط تشير إلى أطوال موجات معينة أو بعبارة أخرى إلى فوتونات ذات طاقة محددة. وينتج من ذلك أن الغاز المتوهج لا يرسل فوتونات لها جميع قيم الطاقة الممكنة بل فقط تلك التي لها قيم نفس الغاز المتوهج. هكذا نرى هنا أيضا كيف تحد الحقائق من كثرة الاحتمالات الممكنة.

فذرات عنصر معين كالأيدروجين مثلا تبعث فوتونات طاقة معينة، ويسمح لتلك الفوتونات ذات الطاقة المعينة بالانطلاق بينما يحال دون خروج الفوتونات الأخرى. ولنفرض – بقصد السهولة – أن عنصرا ما أرسل إشعاعات ذات خط طبقي واحد أي فوتونات ذات طاقة معينة. وحيث أن الذرة تفقد جزءا من طاقتها بالإشعاع فنستطيع بتطبيق قانون الطاقة أن نستنتج أن طاقة الذرة قبل الإشعاع كانت أعلى منها بعده وأن الفرق بين مستويي الطاقة هذين يجب أن يساوي طاقة الفوتون المنبعث. وإذن يمكننا التعبير عما نشاهده من انبعاث أشعة ذات طول موجي واحد أي فوتونات ذات طاقة معينة بالعبارة التالية:

يوجد مستويا طاقة فقط في كل ذرة من ذرات العنصر، ويدلنا انبعاث فوتون من الذرة على انتقالها من مستوى الطاقة المرتفع إلى آخر منخفض. ولكن يوجد عادة أكثر من خط واحد في أطياف العناصر، وإذن تشير الفوتونات المنبعثة إلى وجود مستويات طاقة كثيرة لا واحد فقط. أو بعبارة أخرى يمكننا أن نفرض أن لكل ذرة مستويات طاقة كثيرة لا واحدا فقط. أو بعبارة أخرى يمكننا أن نفرض أن لكل ذرة مستويات

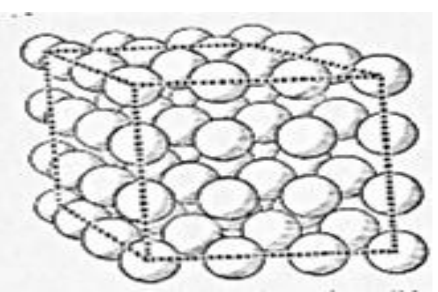
طاقة كثيرة وأن إشعاع فوتون يشير إلى انتقال الذرة من مستو عال إلى آخر منخفض. ومن المهم أن نعلم أنه لا يمكن الذرة أن ترقى إلى كل مستو للطاقة لأننا لا نجد أبدا فوتونات لها جميع قيم الطاقة، أي أشعة لها جميع الأطوال الموجية في طيف أي عنصر، فبدلا من أن نقول إن طيف كل ذرة يحوي خطوطا معينة يمكننا القول بأن لكل ذرة مستويات طاقة معينة وأن انبعاث فوتونات الضوء مصحوب دائما بانتقال الذرة من مستوى طاقة إلى آخر. وتكون مستويات الطاقة عادة منفصلة وغير متصلة، وهذا أيضا يبين لنا كيف تحد الحقائق الطبيعية من كثرة الاحتمالات العلمية.

وقد كان العالم بوهر أول من علل في (١٩١٣) سبب ظهور بعض خطوط الطيف دون أخرى في أطياف العناصر. وقد رسمت نظريته التي وضعت منذ أكثر من أربعين عاما، صورة للذرة، أمكننا بواسطتها – على الأقل في الحالات البسيطة – حساب أطياف العناصر. وبذا أصبحت تلك الأرقام التي كانت لا صلة بينها فجأة ترتبط ببعضها أشد ارتباط على ضوء نظرية بوهر.

وقد كانت نظرية بوهر طريقا مؤديا إلى نظرية أكبر وأدق تسمى بالميكانيكا الموجية أو الكمية. وغرضنا في هذه الصفحات الأخيرة أن نتفرغ لدراسة معتقدات هذه النظرية الأساسية. وقبل أن نبدأ ذلك يجب علينا أن نذكر علينا أن نذكر نتيجة نظرية وأخرى عملية ذات طابع خاص.

يبدأ الطيف المرئي بطول موجي خاص للون البنفسجي، وينتهي بطول موجي آخر للون الأحمر، أو بعبارة أخرى إن طاقة الفوتونات في الطيف المرئي دائما محصورة بين قيمتي طاقتي فوتونات اللونين البنفسجي والأحمر. ويرجع السبب في هذا التحديث طبعا إلى تحديد قدرة العين الإنسانية. فإذا كان الفرق بين طاقتي مستويي طاقة في ذرة ما كبيرا جدا فإن الذرة تقذف خارجها إحدى فوتونات الأشعة فوق البنفسجية، وهذا يمثل بخط خارج الطيف المرئي، ولا يمكن إدراك هذا الخط بالعين المجردة بل بلوح فوتوغرافي مثلا. وتتكون أشعة إكس مثلا من فوتونات ذات طاقة أكبر بكثير من فوتونات الطيف المرئي أو بعبارة أخرى نقل أطوال موجاتها آلاف المرات عن أطوال أمواج الضوء المرئي.

ولكن هل يمكننا عمليا قياس أطوال موجية بهذا القدر من الصغر؟ لقد كان التوصل إلى ذلك غاية في الصعوبة في حالة الضوء العادي، إذا كان علينا أن نعد عوابق صغيرة أو ثقوبا دقيقة لكي يمر خلالها الضوء، فالثقبان الدقيقان اللذان كانا في حجم رأس الدبوس واللذان استخدمناها لتعيين حيود الضوء العادي يجب أن يزداد حجمهما صغرا ويقل بعدهما عن بعض، إذا أردنا مشاهدة حيود الأشعة السينية.



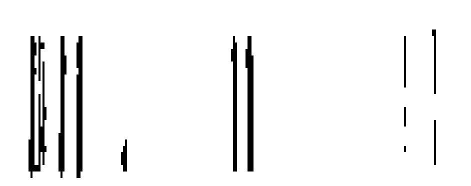
كيف نستطيع إذن قياس أطوال موجات هذه الأشعة؟ لقد ساعدتنا الطبيعة في حل هذه المعضلة. تتكون البللورة من

مجموعة من الذرات تقع على مسافات صغيرة من بعضها ومرتبة ترتيبا خاصا. يبين لنا بالرسم المرفق مثالا بسيطا لتركيب البلورة. فبدلا من الثقوب الدقيقة، تكون الذرات الموجودة في البلورة عوائق متناهية في الصغر مرتبة ترتيبا دقيقا وتقع على مسافات صغيرة من بعضها البعض. وتبلغ المسافات بين الذرات، حسب نظرية تركيب البللورات حدا من الصغر يجعلنا نتوقع احتمال إحداثها لظاهرة الحيود للأشعة السينية. وقد أثبتت التجربة أن من الممكن حدوث ظاهرة الحيود لأمواج الأشعة السينية أثناء مرورها خلال هذه العوائق المتراصة في هذا الحجم الصغير أي حجم البلورة.

لنفرض أن شعاعا من الأشعة سقط على بلورة ثم بعد ذلك على لوح فوتوغرافي لكي نحصل على أنموذج لظاهرة الحيود. هناك طرق عديدة استخدمت في دراسة طيف الأشعة السينية واستنتاج أطوال موجاتها من أنموذج الحيود. ويقتضي منا ذكره بالتفاصيل مجلدات بأسرها إذا رغبنا في ذكر كل التفاصيل العلمية والنظرية. وفي اللوحة "٣" نرى أنموذج الحيود الذي حصل عليه العلماء بإحدى هذه الطرق المختلفة. وهنا أيضا نرى الحافات المعتمة والمضيئة المميزة للنظرية الموجية. ونشاهد في المركز أثر الشعاع الذي لم يعان أي حيود والذي ما كنا نحصل على سواه في حال عدم وجود البلورة بين مصدر الأشعة السينية واللوح الفوتوغرافي. ومن مثل هذه الألواح الفوتوغرافية يمكننا تقدير أطوال موجات الأشعة السينية، وبالعكس إذا علمنا أطوال

الموجات أصبح في استطاعتنا الحصول على معلومات عن تركيب البللورة.

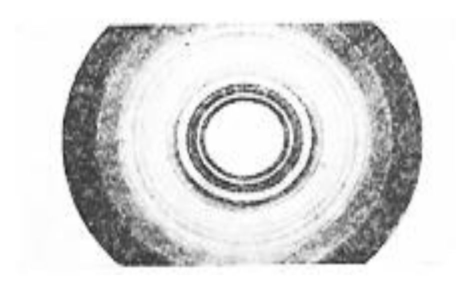
اللوحة الثالثة



خطوط الطيف (أخذ الصورة ا، جـ شفستون)



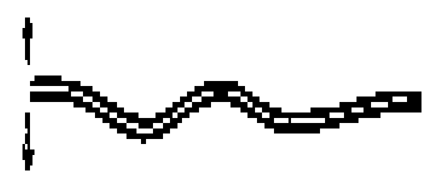
(أخذ الصورة لاستوفيكى و جريجور)
حيود الأشعة السيفية



(أخذ الصورة لوريا وكلينجر)
حيود الموجات الكهربية

أمواج المادة:

نرجع الآن إلى السؤال: كيف نستطيع فهم وجود بعض أطوال موجات مميزة في طيف كل عنصر؟.. ما أكثر ما نجد في علم الطبيعة أمثلة لما يحدث من تقدم أساسي نتيجة لدراسة مقارنات تعقد بين ظواهر لا يبدو أن بينها علاقة ما. وقد رأينا في هذه الصفحات كيف أن معتقدات وضعت وتطورت في أحد فروع العلم ثم طبقت في فرع آخر فحازت نجاحا كبيرا. ويعطينا تطور الآراء الميكانيكية والمجالية أمثلة كثيرة في هذا الصدد. ولعل ربط هذه الموضوعات المحلولة بغيرها التي لم تحل بعد يلقي بعض الضوء على مصاعبنا ويوحي إلينا بآراء جديدة! فمن السهل العثور على علاقة سطحية لا تعني شيئا في الحقيقة، ولكن اكتشاف صفحات أو علاقات أساسية مختفية تحت سطح من الاختلافات الظاهرية ثم استخدامها أساسا لنظرية ناجحة عمل جدي بلا شك غاية في الأهمية. ونشوء ما نسميه بالميكانيكا الموجية وتطورها على أيدي دي بروجلي وشريدنجر منذ أكثر من خمس وعشرين سنة خير مثل لبناء نظرية ناجحة، على أساس مقارنة بارعة موفقة.

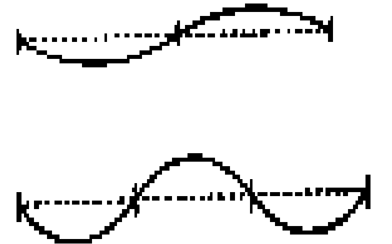


ولنبدأ الآن بمثل كلاسيكي لا علاقة له بعلم الطبيعة الحديث. لنقبض بإحدى أيدينا على طرف أنبوبة طويلة جدا من المطاط أو سلك

حلزوني طويل، ونحاول تحريكه بانتظام حركة دورية إلى أعلى وإلى أسفل حتى يتذبذب طرفه. سنرى – كما سبق رؤية ذلك في أمثلة أخرى – نشوء موجة بسبب هذه الذبذبة وانتشارها خلال الأنبوبة بسرعة معينة. فإذا تصورنا أنبوبة ذات طول لا نهائي فإن أقسام الموجة المبتدئة ستواصل حركتها اللا نهائية المستمرة بدون حدوث تداخل.

لنعتبر مثلا آخر: لنثبت طرفي هذه الأنبوبة أو لعله من الأفضل أن نعتبر قوس كمنجة. ماذا يحدث الآن إذا ما تولدت موجة ما عند أحد طرفي أنبوبة المطاط أو القوس؟ ستبدأ الموجة رحلتها كما في المثال السابق ولكنها سرعان ما ترتد عند الطرف الآخر للأنبوبة. وسيكون لدينا بذلك موجتان: إحداهما تولدت من حركة الذبذبة والأخرى بالانعكاس، وسيتحركان في اتجاهين متضادين ويحدث بينهما تداخل. وليس من العسير علينا تتبع هذا التداخل واكتشاف الموجة الوحيدة الناتجة من تركيبهما مع بعضهما والتي تسميها بالموجة الساكنة، ولعل الكلمتين "الموجة الساكنة" تظهران متناقضين، ولكن تركيب هاتين الموجتين مع بعضهما أدى إلى الجمع بين هاتين الكلمتين. وأبسط أمثلة الموجة الساكنة هو حركة قوس مثبت من طرفية حركة رأسية كما هو موضح في الشكل وهذه الحركة ناتجة عن وقوع موجهة فوق أخرى عندما تكون الموجتان متحركتين في اتجاهين متضادين. ومن مميزات هذه الحركة ثبوت طرفي السلك، وتسمى نقطتا الطرفين

بالعقدتين. ويمكننا القول بأن الموجة تسكن بين عقدتين بينما تواصل بقية السلك حركتها الرأسية.



ولكن هذه أبسط أنواع الموجة الساكنة؛ فهناك أخرى، إذ قد يكون للموجة الساكنة ثلاث عقد، اثنان في طرفي السلك والآخر في منتصفه. وتكون لدينا في هذه الحالة ثلاث نقاط ساكنة. وتكفي نظرة نلقيها على الرسوم الموضحة هنا لترينا أن طول الموجة هنا يبلغ نصف طولها في المثال السابق ذي العقدتين. وبالمثل قد يكون للموجات الساكنة أربع أو خمس عقد أو أكثر. ويتوقف طول الموجة في كل حالة على عدد العقد. ولا بد أن يكون هذا العدد صحيحا وقد يتغير فقط على دفعات. فعبارة مثل "عدد العقد في موجة ساكنة هو ٣ . ٥٧٦" مجرد هراء. وإذن يتغير طول الموجة تغيرا منقطعا. أي في هذا المثال الكلاسيكي قد وجدنا إحدى خصائص نظرية الكم المألوفة، وتزداد الموجة الساكنة التي يحدثها لاعب الكمان تعقيدا، إذ أنها خليط من موجات عديدة لها ٢ ، ٣ ، ٤ ، ٥ ، عقد ، أي خليط من أطوال موجبة كثيرة . وفي استطاعة علم الطبيعة تحليل مثل هذا الخليط إلى مركباته من الأمواج الساكنة البسيطة التي يتكون منها. ويمكننا القول بلغة مصطلحاتنا السباقة أن الوتر المتذبذب له طيف، تماما كما يتميز كل عنصر بطيفه الإشعاعي.

وكذلك أيضا – كما كانت الحال في أطياف العناصر – لا نشاهد في الوتر إلا ذبذبات معينة لا يسمح بوجود سواها.

ها نحن قد اكتشفنا بعض أوجه شبه بين القوس المتذبذب والذرة المشعة، ومهما بدا من غرابة هذا التشابه فسنستمر في دراستنا محاولين استنتاج ما نستطعمه معه وسنمضي قدما في المقارنة. تتكون ذرات كل عنصر من جسيمات أولية إحداها ثقيلة وتسمى بالنواة، والأخرى خفيفة وهي الكهارب، وتشبه هذه المجموعة آلة صوتية صغيرة تحدث فيها موجات ساكنة.

ومع ذلك فليست الموجة الساكنة سوى نتيجة لتداخل موجتين متحركتين أو أكثر، فإذا كان في هذه المقارنة بعض الحقيقة فلا بد من وجود صورة أسهل من صورة الذرة لكي تمثل الموجة المنتشرة. فما هي يا ترى أسهم تلك الصورة؟ لا يوجد في عالمنا المادي ما هو أسهل من الكهرب الذي لا تؤثر عليه أية قوى أو بعبارة أخرى الكهرب الساكن أو المتحرك حركة منتظمة. ولعلنا نسترسل في تشبيهنا فنمثل الكهرب المتحرك بانتظام بأمواج ذات طول معين. وهذه هي فكرة دي بروجلي الحديثة والجزئية في نفس الوقت.

وقد كان معروفا قبل ذلك وجود ظواهر تتجلى منها الصفات الموجية للضوء وأخرى تتضح منها الصفات الجسمية. وبعد أن أخذنا بوجهة النظر الموجية، وجدنا لدهشتنا أنه في بعض الحالات كحالة

الظاهرة الكهروضوئية مثلا يسلك الضوء تماما سلوك سيل من الفوتونات. أما في حالة الكهارب فخواصها عكس ذلك تماما. إذ أننا اعتدنا تشبيه الكهارب بجسيمات هي الكمات الأولية للكهرباء والمادة، وقد درست شحنتها وكتلتها، فإذا كان هناك شيئ من الحقيقة في فكرة دي بروجلي فإنه لا بد من وجود بعض ظواهر تتجلى فيها الخواص الموجية للمادة، وهذه النتيجة التي توصلنا إليها عن طريق المشابهة الصوتية تبدو غريبة يصعب تصديقها، فكيف يمكن أن يكون لجسم متحرك أي صفات موجية؟ ولكن ليست هذه أول مرة نقابل فيها معضلة من هذا النوع في عالم الطبيعة، فقد قابلنا المعضلة في علم الظواهر الضوئية.

تقوم الآراء الأساسية بأهم دور في تكوين النظريات الطبيعية. وكتب علم الطبيعة ملأى بمعادلات رياضية معقدة، ولكن الآراء والأفكار – لا المعادلات – هي التي تؤدي إلى ظهور النظريات الطبيعية. ثم تأخذ الآراء والأفكار بعد ذلك الشكل الرياضي المحدد للنظرية، بحيث يمكن مقارنة نتائجها بالتجربة. ويمكننا إيضاح ذلك بمثل المسألة التي نحن بصددها الآن؛ فالفكرة الرئيسية هي أن الكهارب المنتظمة الحركة تسلك في بعض الظواهر المسلك الموجي. لنفرض أن لدينا كهرباء أو مجموعة من الكهارب – ذات سرعة واحدة – تتحرك بانتظام. ونحن نعلم قيم كتلة الكهرب وشحنته وسرعته، فإذا أردنا إلحاق الصفة الموجية للكهرب المنتظم الحركة بكيفية ما، فإن سؤالنا التالي هو: ما هو طول الموجة؟ ويتطلب هذا السؤال وضع نظرية تمكننا من تقدير قيمة هذا الطول الموجي الملحق بالكهربا. وهذه مسألة بسيطة، والسهولة الرياضية لعمل

دي بروجلي عند إجابته على هذا السؤال تدعو حقا إلى العجب؛ ففي الوقت الذي وضعت فيه هذه النظرية كانت النظريات الطبيعية الأخرى مليئة بالرياضيات الغامضة والمعقدة، أما رياضة الأمواج الملحقة بالمادة فهي غاية في البساطة، في حين أن الفكرة الأساسية آية في عمق التفكير.

وقد رأينا في حالة الأمواج الضوئية والفوتونات أنه يمكننا نقل أي عبارة صيغت بلغة الأمواج إلى لغة الفوتونات أو جسيمات الضوء. سنطبق نفس الشيئ على الأمواج الكهربية. ولغة الجسيمات مألوفة لنا في حالة الكهارب المنتظمة الحركة ويمكننا نقل كل عبارة صيغت بلغة الجسيمات إلى اللغة الموجية تماما كما في حالة الفوتونات. وقد سهل لنا مهمة هذه الترجمة عاملان: أولهما هو التشابه بين أمواج الضوء وأمواج الكهرب أو بين الفوتونات والكهارب. وسنحاول استخدام نفس طريقة الترجمة للمادة كما استخدمناها للضوء. وقد أمدتنا نظرية النسبية الخاصة بالدليل الآخر، فقوانين الطبيعة يجب أن تكون لازمة بالنسبة لتحويلات لورنتز لا بالنسبة للتحويلات الكلاسيكية. ويمكننا تعيين طول الموجة الملحقة بكهرب متحرك تماما بواسطة هذين العاملين؛ فينتج من ذلك أن كهربا متحركا بسرعة ١٠.٠٠٠ ميلا في الثانية مثل له طول موجي، من السهل تقدير قيمته وقد وجد أنه يقرب من أطوال موجات الأشعة السينية. وإذن نستنتج من ذلك أنه إذا كان إدراك الخواص الموجية للمادة ممكنا فإنه يجب إجراء تجارب مماثلة لتلك التي أجريت على الأشعة السينية.

لنعتبر حزمة أو شعاعا من الكهارب تتحرك بانتظام بسرعة معينة أي موجة كهربائية متجانسة، إذا استخدمنا المصطلحات الموجية، ولنفرض أنها تسقط على بللورة رقيقة جدا تمثل دور محزوز الحيود. وتبلغ المسافات بين العوائق المسببة للحيود في البللورة – أي بين الذرات – حدا كبيرا من الصغر يكفي لإحداث الحيود للأشعة السينية. فلعلنا نتوقع ظاهرة متشابهة لتلك عند استعمال الموجات الكهربية ذات الطول الموجي القريب من الأشعة السينية. ويمكن تسجيل حيود هذه الموجات الكهربية عند مرورها خلال الطبقة الرقيقة من البللورات الموجودة في لوح فوتوغرافي. وفي الحقيقة تظهر هذه التجربة ما يمكننا اعتباره بلا شك نصرا رائعا للنظرية، ألا وهو ظاهرة حيود الموجات الكهربية. والتشابه بين حيود الموجات الكهربية والأشعة السينية ملفت للنظر كما يرى من مقارنة النماذج في اللوحة (٣). وتمكننا مثل هذه الصور من تقدير أطوال موجات الأشعة السينية. وينطبق نفس الكلام على الموجات الكهربية، فيعطينا أنموذج الحيود طول الموجة المادية مع التأييد العملي التام للنظرية، وفي هذا تأييد شامل لاستنتاجاتنا.

ومع ذلك فهذه النتيجة تزيد في متاعبنا! كما يتضح من الحالة المشابهة لذلك في حالة أمواج الضوء التي سبق ذكرها، فإذا سلط كهرب على ثقب دقيق جدا فإنه سيحيد عن طريقه تماما كما تفعل موجة ضوئية، وسنشاهد على اللوح الفوتوغرافي حلقات مضيئة. ربما كان هناك بعض الأمل في شرح هذه الظاهرة أيضا بتفاعل بين الكهرب وحافة المعترض على الرغم من أن مثل هذا الشرح بعيد الاحتمال. ولكن ماذا عن ثقبي

الدبوس المتجاورين؟.. ستظهر خطوط بدلا من الحلقات. كيف يمكن أن يكون وجود الثقب الآخر سببا في إحداث هذا التغير؟ فالكهرب لا يمكن شطره وليس له إلا أن يمر خلال أحد الثقبين. كيف يمكن للكهرب أن يعلم أثناء مروره خلال أحد الثقبين أن هناك ثقبا آخرا قريبا منه؟

وقد سبق أن تساءلنا عن ماهية الضوء.. أهو سيل من الجسيمات أم موجة؟ ويحق لنا الآن أن نسأل ما هي المادة وما هو الكهرب؟ هل هو جسيم أو موجة؟ ويحق لنا الآن أن نسأل ما هي المادة وما هو الكهرب؟ هل هو جسيم أو موجة؟.. فالكهرب له خواص الجسيم عندما يتحرك في مجال كهربائي أو مغناطيسي خارجي وله الخواص الموجية عندما يحيد أثناء مروره خلال بللورة. وقد قابلنا عند دراستنا لكمات المادة الأولية نفس الصعاب التي لاقيناها أثناء دراستنا لكمات الضوء. وبذلك ينشأ الآن السؤال التالي وهو من أهم الأسئلة التي أثارها التطور العلمي الحديث: كيف نجمع بين الرأيين المتعارضين عن المادة والأمواج؟.. وهذه المعضلة هي من ذلك النوع الذي يؤدي حله إلى تقدم علمي لا شك فيه. وقد حاول علم الطبيعة الحديثة حل هذه المشكلة، والأمر الآن متروك للمستقبل لكي يقرر ما إذا كان هذا الحل الذي اقترحه علم الطبيعة الحديث دائما أم مؤقتا فقط!

أمواج الاحتمال:

إذا علمنا موضع نقطة مادية وسرعتها والقوى الخارجية المؤثرة عليها فإننا نستطيع – طبقا لقواعد الميكانيكا الكلاسيكية – التنبؤ بحركة النقطة المستقبلية بواسطة استخدام القوانين الميكانيكية. والعبارة "للنقطة المادية السرعة كذا عند الموضع كذا في لحظة ما" لها معنى محدد في الميكانيكا الكلاسيكية.

وقد حاول العلماء – في أوائل القرن التاسع عشر – شرح ظواهر علم الطبيعة على أساس الفرض بوجود قوى بسيطة تؤثر على جسيمات مادية ذات مواضع معينة وسرعات معينة عند لحظة ما. لنحاول تذكر كيف وصفنا الحركة عندما تكلمنا عن الميكانيكا عند بدء استعراض لظواهر علم الطبيعة الحديثة؛ فقد رسمنا نقطا على مسار معين كي توضح لنا مقادير واتجاهات السرعات. وقد كان هذا كله بسيطا وسهل الفهم، ولكننا لا نستطيع تطبيق ذلك كله على كمات المادة الأولية (أي الكهارب) أو على كمات الطاقة الأولية (أي الفوتونات) حيث أنه ليس في الإمكان تمثيل حركة فوتون أو كهرب بالطريقة التي تخيلنا بها الحركة في الميكانيكا الكلاسيكية، وليس مثال ثقبي الدبوس عنا ببعيد. ويبدو لنا أن كلا من الفوتون أو الكهرب يمر خلال الثقبين معا في نفس الوقت، وبذلك يصبح من المستحيل شرح هذه الظاهرة باعتبار مسار الفوتون أو الكهرب طبقا للنظرية الكلاسيكية القديمة. وبديهي أنه يجب علينا التسليم بوجود حركات أولية مثل مرور الكهارب والفوتونات خلال

الثقوب. وليس هناك شك في وجود الكمات الأولية للمادة والطاقة ولكن من المؤكد أيضا أننا لا نستطيع وضع القوانين الأولية على أساس تحديد الأماكن والسرعات عند لحظة ما بطريقة الميكانيكا الكلاسيكية السهلة.

لنحاول الآن تجربة أخرى بأن نكرر هذه الحوادث الأولية كأن نرسل الكهارب الواحد تلو الآخر في اتجاه ثقبي الدبوس الصغيرين. وسيكون استخدام الكلمة "كهرب" على سبيل التحديد فقط في هذه الحالة، وينطبق نفس الكلام على الفوتونات.

لنفرض أننا أعدنا هذه التجربة مرات عديدة بنفس الطريقة أي أن الكهارب تتحرك في اتجاه ثقبي الدبوس بنفس السرعة الواحد تلو الآخر. وغني عن الذكر أن هذه التجربة مثالية أي أننا لا يمكننا القيام بها عمليا ولكننا نستطيع تخيلها فقط إذ أنه ليس في الإمكان إطلاق الكهارب والفوتونات فرادى كما ينطلق الرصاص من البندقية.

ومن الطبيعي أن يؤدي تكرار هذه التجارب إلى الحصول على حلقات مظلمة وأخرى مضيئة إذا كان لدينا ثقب واحد وعلى خطوط مضيئة ومعتمة إذا كان لدينا ثقبان. ولكن هناك فرق أساسي، وذلك أنه في حالة الكهرب الوحيد كان من العسير علينا تصور نتيجة التجربة في حين أنه يسهل فهمهما إذا تكررت العملية مرارا، حيث يمكننا أن نقول الآن: تظهر الخطوط المضيئة عندما تسقط على أماكنها كهارب كثيرة.

أما في الخطوط المظلمة فيقل عدد الكهارب الساقطة كثيرا، وينعدم سقوط الكهارب في المنطقة ذات الظلام الكامل. وبديهي أننا لا نستطيع أن نفرض أن جميع الكهارب تمر من خلال أحد الثقبين فقط لأنه إذا كان ذلك صحيحا فإن تغطية الثقب الآخر يجب ألا تسبب أي فرق، ولكننا نعلم أن تغطية الثقب الآخر يجب ألا تسبب أي فرق، ولكننا نعلم أن تغطية الثقب الثاني تغير فعلا في نتيجة التجربة. وحيث أن الكهرب غير قابل للانشطار فإننا لا نستطيع تصور مروره من كلا الثقبين في نفس الوقت، فإذا يمهد لنا تكرار التجربة مخرجا من هذا المأزق، إذ نستطيع القول بأن بعض الكهارب تمر من أحد الثقبين وتنفذ البقية من الثقب الآخر، ولا يمكننا معرفة سبب تفصيل الكهارب لثقوب خاصة ولكن يجب أن تكون نتيجة تكرار التجربة اقتسام الثقبين للكهارب الساقطة من المصدر والمتجهة إلى الحاجز الذي تتكون عليه نماذج الحيود. فإذا ذكرنا فقط ما يحدث للكهارب عند إعادة التجربة، غير عابئين بسلوك الكهارب الفردية، فإن شرح الفرق بين دوائر الحيود والخطوط يصبح يسيرا. وهكذا أدت دراسة سلسلة من التجارب إلى نشوء فكرة "مجموعة" أو "جمع" من الجسيمات التي لا نستطيع التنبؤ بخواصها الفردية. فلا يمكننا مثلا أن نتنبأ بمسار كهرب فردى، ولكننا نستطيع أن نتنبأ بنتيجة حركة المجموعة كلها ألا وهي حدوث خطوط مضيئة ومظلمة على الحاجز.

لنترك علم الطبيعة الكمي جانبا الآن بعض الوقت. لعلنا نذكر أننا إذا علمنا مكان وسرعة نقطة عادية عند لحظة ما والقوى المؤثرة عليها

في علم الطبيعة الكلاسيكي فإننا نستطيع التنبؤ بحركة النقطة المستقبلة. وقد رأينا بعد ذلك كيف طبقت وجهت النظر الميكانيكا على نظرية الحركة للمادة، وكيف أدت دراستنا لهذه النظرية إلى نشوء فكرة ستكون ذات فائدة كبيرة لنا فيما بعد إذا فهمناها حق الفهم.

لنفرض أن لدينا وعاء به غاز. إذا أردنا تتبع حركة كل جسيم فإن علينا أن نبدأ بإيجاد الظروف الابتدائية أي الأوضاع والسرعات الابتدائية لجميع الجسيمات. وحتى إذا فرضنا إمكان ذلك فإن تسجيل النتيجة على الورق تستغرق وقتا أطول من حياة الإنسان نظرا لضخامة عدد الجسيمات التي علينا أن نعتبرها. وإذا رغبنا بعد ذلك في استخدام طرق الميكانيكا الكلاسيكية لحساب الأوضاع النهائية للجسيمات فإننا نقابل صعابا لا يمكننا التغلب عليها. فمن المسلم به مبدئيا أننا نستطيع استخدام الطريقة المتبعة في دراسة حركة النجوم ولكننا لا نستطيع القيام بها عمليا، وإذن لا مفر من أن نلجأ إلى الطريقة الإحصائية. وليست هذه الطريقة في حاجة إلى المعرفة التامة للأحوال الابتدائية، وبذلك تقل معلوماتنا عن أية مجموعة من جسيمات الغاز عند لحظة ما، ويتبع ذلك ضعف قدرتنا على معرفة الأحوال الماضية والمستقبلة للمجموعة. ولن نهتم بمصير كل جسيم على حدة بل ستصبح مسألتنا الآن ذات طبيعة خاصة. فمثلا لن نسأل: "ما هي سرعة كل جسم عند هذه اللحظة" ولكن ربما نسأل: "كم عدد الجسيمات التي تنحصر سرعتها بين ١٠٠٠ ، ١١٠٠ قدما في الثانية". أي أننا لن نهتم أبدا بالأفراد، ولكننا سنحاول فقط تعيين الخواص العامة للمجموعة كلها كوحدة. ومن البديهي أن

الطريقة الإحصائية لن تصح إلا إذا احتوت المجموعة على عدد كبير جدا من الأفراد.

ولا يمكننا معرفة سلوك فرد داخل مجموعة ما عند استخدام الطريقة الإحصائية بل يمكننا فقط أن نتكلم عن احتمال سلوكها بطريقة معينة. فإذا أخبرتنا القوانين الإحصائية بأن ثلث الجسيمات لها سرعة بين ١٠٠٠ ، ١١٠٠ قدمت في الثانية فإن هذا يعني أنه بتكرار عملية القياس على جسيمات كثيرة نحصل على هذا العمل المعدل حقيقة أو بعبارة أخرى أن احتمال وجود جسيم لهذا القدر من السرعة هو ١\٣.

وبالمثل لكي نقدر معدل التكاثر في مجتمع كبير، لا يكفي أن نعلم أن أسرة ما قد رزقت بطفل، إذ أن ما يهمنا هو معرفة نتيجة إحصائية ليس للأفراد فيها دور خاص.

وإذا حاولنا تسجيل أرقام عدد كبير من السيارات فإننا سرعان ما نكتشف أن ثلث هذه الأرقام تقبل القسمة على ثلاثة. ولكننا لا يمكننا أن نجزم بأن السيارة التي ستمر بنا بعد لحظة ستحمل رقما له هذه الخاصية؛ فالقوانين الإحصائية يمكن تطبيقها على مجموعات كبيرة فقط، ولكنها لا تنطبق على أعضاء تلك المجموعة كلها على انفراد.

ويمكننا الآن العودة إلى موضعنا الكمي. تتميز قوانين علم الطبيعة الكمي بطابع إحصائي أي أنها لا تخص فردا واحدا بذاته بل مجموعة

أفراد متجانسة، ولا يمكن تحقيق هذه القوانين بإجراء قياس على فرد واحد، بل فقط بسلسلة من تجارب متكررة.

ويحاول علم الطبيعة الكمي مثلا صياغة قوانين خاصة بالتفكك الإشعاعي لتتحكم في التحولات الذاتية من عنصر إلى آخر؛ فالمعلوم مثلا أنه في ١٦٠٠ عام يتفكك نصف جرام من الراديو ويتبقى النصف الآخر. ويمكننا معرفة عدد الذرات التي ستتفكك في نصف الساعة القادمة، ولكننا في نفس الوقت لا نستطيع أن نقول لماذا يقضى على هذه الذرات ذاتها دون الأخرى؟ وليس في استطاعتنا – حسب معلوماتنا الحالية – تعيين الذرة المقضي عليها بالتفكك، ولا يتوقف مصرع الذرة على عمرها، ولا يوجد قانون يختص بدراسة سلوك الذرة الفردي وأحوالها الخاصة، ولكننا نستطيع فقط صياغة قوانين إحصائية تتحكم في مجموعات من الذرات.

لنعتبر مثلا آخر: إذا وضع غاز مضيء لمادة ما أمام المطياف، فإننا نشاهد خطوطا ذات أطوال موجية معينة. ويعتبر ظهور مجموعة متقطعة ذات أطوال موجية معينة من خواص الظواهر الطبيعية التي اكتشفنا فيها وجود الكمات الأولية. ولكن هناك ناحية أخرى للموضوع؛ فهناك خطوط زاهية وأخرى باهتة، ويستلزم الخط الزاهي إشعاع عدد كبير من الفوتونات التابعة لهذا الطول الموجي المعين، ويعني الخط الباهت إشعاع عدد ضئيل نسبيا من الفوتونات الملحقة بهذا الطول الموجي. وهنا تعطينا النظرية أيضا شروحا لها طابع إحصائي فقط، ويشير كل خط

إلى انتقال من مستوى طاقة عال إلى آخر منخفض. وتخبرنا النظرية عن احتمال حدوث كل من هذه الانتقالات الممكنة، ولكنها لا تنبئنا شيئا عن انتقال ذرة فردية بذاتها، وقد أصابت النظرية نجاحا كبيرا لأن جميع هذه الظواهر تتضمن جموعا كبيرة لا أفراد. ويظهر أن علم الطبيعة الكمي الحديث يشبه نظرية الحركة للمادة بعض الشيئ حيث أن لكليهما طابع إحصائي، ويشير كل منهما إلى جموع كبيرة. ولن تهمنا نقاط التشابه في هذه المقارنة فقط بل نقط الاختلاف أيضا. وينحصر معظم التشابه بين نظرية الحركة للمادة والطبيعة الكمية في الطابع الإحصائي لكل منهما، ولكن ما هي أوجه الاختلاف؟

إذا رغبنا في معرفة الرجال والنساء الذين تزيد أعمارهم عن ٢٥ عاما في مدينة ما فإننا يجب علينا أن نطلب إلى كل مواطن أن يملأ في استمارة خاصة البيانات التي تقع تحت العناوين "ذكر"، "أنثى"، "العمر". وبفرض صحة كل إجابة فإننا سنحصل – بعد عد وتقسيم بيانات الاستمارات – على نتيجة ذات طابع إحصائي حيث أن أسماء الأشخاص وعناوينهم لا تهمنا في شيء. وقد تولد الطابع الإحصائي من معرفة الحالات الفردية. وكذلك الحال في نظرية الحركة للمادة إذ توجد لدينا قوانين إحصائية تتحكم في المجموعات وبنيت على أساس الحالات الفردية.

ولكن الوضع يختلف تمام الاختلاف في علم الاختلاف في علم الطبيعة الكمي، إذ تنتج هذه القوانين الإحصائية فورا دون اعتبار أي

وجود للحالات الفردية. وقد رأينا في مثال الفوتون أو الكهرب وثقبي الدبوس أننا لا نستطيع وصف الحركة الممكنة للجسيمات الأولية في المكان والزمان كما فعلنا في علم الطبيعة الكلاسيكية، أي أن علم الطبيعة الكمي يلغي وجود القوانين الفردية للجسيمات الأولية، ويذكر لنا مباشرة القوانين التي تتحكم في الجموع. ويستحيل علينا – على أساس الطبيعة الكمية – وصف مكان وسرعة جسم أولي أو التنبؤ بحركته المستقبلية كما هي الحال في الطبيعة الكلاسيكية. وتهتم الطبيعة الكمية فقط بالجموع وتنطبق قوانينها عليها لا على الأفراد.

وإن الحاجة الملحة – وليست الرغبة في التجديد – هي التي دفعتنا إلى تغيير وجهة النظر الكلاسيكية. وقد سبق لنا إيضاح متاعب تطبيق وجهة النظر القديمة في مثال ظاهرة الحيود، وهناك أمثلة أخرى عديدة مشابهة يمكننا ذكرها. وتدفعنا محاولاتنا لفهم الحقائق الطبيعية إلى تغيير وجهات نظرنا باستمرار. والأمر متروك للمستقبل لكي يحكم ما إذا كنا قد سلكنا الطريق الصواب الوحيد أو إذا كان هناك حل لمتاعبنا خير من هذا الحل الذي وجدناه.

وقد كان علينا أن ننبذ وصف الحالات الفردية كحالات واقعية في الزمان والمكان، وتحتم علينا أن نستخدم قوانين لها طابع إحصائي. هذه هي الخطوط الرئيسية لعلم الطبيعة الكمي.

وعندما بدأنا – فيما سبق – دراسة ظواهر طبيعية جديدة كالمجال الكهرومغناطيسي ومجال الجاذبية حاولنا – في عبارات مهمة عامة – شرح الخواص الرئيسية للمعادلات التي صيغت فيها العقائد والآراء رياضيا. وسنحاول الآن عمل نفس الشيئ في الطبيعة الكمية مشيرين باختصار إلى أعمال بوهر ودي بروجلي وشرودينجر وهيزنبرج وديراك وبورن.

لنعتبر حالة كهرب واحد، وقد يكون الكهرب تحت تأثير مجال كهرومغناطيسي خارجي أو قد لا يؤثر عليه أي مؤثر خارجي. وربما تحرك مثلا في مجال نواة ذرة ما أو ربما سقط على بللورة وحاد عنها. وترشدنا الطبيعة الكمية إلى كيفية صياغة المعادلات الرياضية الخاصة بكل من هذه الموضوعات.

وقد سلمنا الآن بالتشابه الموجود بين وتر متذبذب أو غشاء أو آلة هوائية أو أي آلة صوتية أخرى من جانب وبين الذرة المشعة من جانب آخر. وهناك أيضا بعض التشابه بين المعادلات الرياضية المتحكمة في المسائل الصوتية وبين تلك المتحكمة في موضوع الطبيعة الكمية. ولكن التفسيرات الطبيعية للكميات المعينة في هاتين الحالتين تختلف تماما عن تلك التي تصف الذرة المشعة، رغما عما يبدو من تشابه ظاهري في المعادلات. ويمكننا أن نسأل في حالة الوتر عن مقدار ابتعاد نقطة ما على الوتر المتحرك في لحظة معينة عن وضعها الأصلي. وإذا عرفنا شكل الوتر المتذبذب عند لحظة معلومة فإننا نستطيع الحصول على ما

نريد. وإذن يمكننا تقدير قيمة الانحراف عن الوضع الأصلي عند لحظة ما من المعادلات الرياضية للوتر المتذبذب، ونستطيع الآن التعبير عن توقف انحراف القوس عن موضعه الأصلي لكل نقطة من نقاط القوس على الوجه التالي: عند لحظة ما يكون الانحراف عن الوضع العادي دالة تتوقف على إحداثيات القوس. وتكون جميع نقاط القوس متصلا ذا إحداثي واحد، ويكون الانحراف دالة تعرف في هذا المتصل ذي الإحداثي الواحد، وتقدر قيمتها من معادلات القوس المتذبذب.

وبالمثل في حال الكهرب توجد دالة معينة لكل نقطة من نقاط الفراغ عند أية لحظة، وسنسمي هذه الدالة موجة الاحتمال. وتشير موجة الاحتمال – في مقارنتنا – إلى الانحراف عن الوضع العادي في المسألة الصوتية؛ أي أن الموجة الاحتمالية – عند لحظة ما – هي دالة في فضاء ذي ثلاثة إحداثيات، بينما كان الانحراف في حالة الوتر عند لحظة ما دالة في فضاء ذي إحداثي واحد.

وتحمل الموجة الاحتمالية في ثناياها كل ما نستطيع الحصول عليه من المعلومات الخاصة بالمجموعة الكمية التي ندرسها، ونستطيع بواسطتها الإجابة على كل الأسئلة ذات الصبغة الإحصائية التي تتعلق بتلك المجموعة. ولكنها لن تكون بذات فائدة إذا أردنا منها تعيين مكان وسرعة الكهرب عند لحظة ما، لأنه ليس هناك أي معنى لمثل هذا السؤال في الطبيعة الكمية. ولكنها ستخبرنا عن احتمال العثور على الكهرب في مكان ما أو أين تتاح لنا فرصة العثور على الكهرب. ولا

تشير التجربة إلى فرد بل تجارب كثيرة متكررة. أي أن معادلات الطبيعة الكمية تعين لنا الموجة الاحتمالية تماما كما تعين لنا معادلات ماكسويل المجال الكهرومغناطيسي، وأيضا كما تعين معادلات الجاذبية مجال الجاذبية. ولكن الكميات الطبيعية التي تعينها معادلات الجاذبية مجال الجاذبية. ولكن الكميات الطبيعية التي تعينها معادلات الطبيعة الكمية ليست ذات معان مباشرة كما هي الحال في معادلات المجال الكهرومغناطيسية والجاذبية، إذ أنها تعطينا فقط الطرق الرياضية للإجابة على أسئلة ذات طابع إحصائي.

وكنا حتى الآن معنيين بدراسة حركة الكهرب في مجال خارجي معين؛ فإذا اعتبرنا جسيما آخر له شحنة أكبر تحملها كتلة تبلغ ملايين المرات ضعف كتلة الكهرب فإننا نستطيع أن نغض النظر في نظرية الكم بأسرها وندرس المسألة طبقا لقوانين الطبيعة الكلاسيكية. فإذا تكلمنا عن التيارات الكهربائية داخل الأسلاك، أو موصلات مشحونة، أو الأمواج الكهرومغناطيسية فإننا يمكننا تطبيق مبادئ علم الطبيعة البسيطة التي تتضمنها معادلات ماكسويل، ولكننا لا نستطيع عمل ذلك عند ما تتكلم عن الظاهرة الكهروضوئية أو شدة خطوط الطيف أو النشاط الإشعاعي أو حيود الموجات الكهربية (الإلكترونية) وظواهر عديدة أخرى يظهر فيها الطابع الكمي للمادة والطاقة، فبينما كنا نتكلم عن مواضع وسرعات جسيم واحد في الطبيعة الكلاسيكية، إذ بنا نرى أنه يجب علينا الآن أن نعتبر أمواج الاحتمال في متصل ذي ثلاثة أبعاد خاص بهذا الجسيم

وحده. وتتميز الطبيعة الكمية بطريقة خاصة في معالجة موضوع ما إذا علمنا كيفية دراسته من وجهة نظر الطبيعة الكلاسيكية.

وللجسيم الأولي – سواء أكان كهربا أو فوتونا – أمواج احتمال تنشر في متصل ذي ثلاثة أبعاد وتعطينا الخواص الإحصائية إذا تكررت التجربة مرات عديدة. ولكن ماذا نظن بجسيمين متفاعلين – بدلا من حالة الجسيم المنفرد التي كنا ندرسها – ككهربين أو كهرب وفوتون أو كهرب ونواة؟ لن تستطيع دراسة كل على حدة ووصفها بواسطة موجة احتمال في ثلاثة أبعاد فقط بسبب تفاعل الجسمين معا. وفي الحقيقة أنه ليس من العسير علينا أن نصف مجموعة مكونة من جسمين متفاعلين في الطبيعة الكلاسيكية؛ لذلك يجب علينا أن ندير وجوهنا هنيهة شطر الطبيعة الكلاسيكية. يتميز موضعنا نقطتين ماديتين في الفراغ عند لحظة ما بستة أرقام، ثلاثة منها لكل من النقطتين. وتكون كل الأوضاع الممكنة للنقطتين الماديتين متصلا ذا ستة أبعاد – لا ثلاثة – كما كانت الحال عند دراسة جسيم واحد. فإذا أرجعنا البصر ثانية إلى الطبيعة الكمية فإننا نحصل على أمواج احتمال في متصل ذي ستة أبعاد، لا ثلاثة كما هي الحال عند دراسة حركة جسيم واحد. وكذلك الحال إذا درسنا ثلاثة أو أربعة جسيمات أو أكثر حيث تكون أمواج الاحتمال دوالا في متصلات ذات تسعة أو اثتني عشر بعدا أو أكثر.

ونرى من هذا بسهولة أن أمواج الاحتمال ليست سوى أمواج مجردة، تختلف عن الأمواج الكهرومغناطيسية والجاذبية التي توجد

وتنتشر في فضائنا ذي الأبعاد الثلاثة. ويعتبر المتصل ذو الأبعاد العديدة أساسا لأمواج الاحتمال. ويكون عدد أبعاد هذا المتصل مساويا لعدد أبعاد فضائنا العادي عند دراسة جسيم مادي واحد أي ثلاثة أبعاد. والمعنى الطبيعي الوحيد لموجة الاحتمال هو أنها تمكننا من الإجابة على أسئلة إحصائية ذات فائدة كبيرة في حالة جسيم واحد أو جسيمات كثيرة، فمثلا في حالة الكهرب الواحد، يمكننا أن نسأل عن احتمال وجود الكهرب في مكان ما، وفي حالة جسمين يمكننا أن نسأل عن احتمال وجود الكهربين في مكانين معينين عند لحظة ما؟

وقد كان أول انحراف لنا عن وجهة النظر الكلاسيكية هو في نبذنا لوصف الحالات الفردية كأحداث في الزمان والمكان. وقد كنا مضطرين إلى استخدام الطريقة الإحصائية بواسطة أمواج الاحتمال، وحيث أننا اخترنا هذا الطريق فقد أصبح لزاما علينا أن نمضي قدما نحو التجريد المطلق، وأصبح لا مفر من استخدام أمواج الاحتمال ذات الأبعاد العديدة لوصف مسائل الجسيمات العديدة.

دعنا على سبيل الاختصار نطلق على كل شئ ما عدا الطبيعة الكمية، اسم الطبيعة الكلاسيكية؛ فهناك إذن اختلاف جوهري بين الطبيعة الكلاسيكية وبين الطبيعة الكمية، إذ أن الطبيعة الكلاسيكية تهتم بوصف الأجسام الموجودة في المكان ووضع قوانين لتمثل تغيرها مع الزمن. ولكن الظواهر التي تكشف لنا عن الطابع الجسيمي والموجي للمادة والإشعاع، والطابع الإحصائي للأحداث الأولية مثل التفكك

الإشعاعي والحيود وإشعاع الخطوط الطيفية، وغير ذلك اضطرتنا إلى نبذ هذا الرأي؛ فالطبيعة الكمية لا تهتم بوصف أجسام ذات أوضاع معينة ودراسة تغيراتها مع الزمن. فلن تجد في الطبيعة الكمية عبارات مثل "هذا الجسم هو كذا وله من الصفات كذا وكذا" بل ترى عبارات مثل "كذا وكذا تمثل الاحتمال بأن يكون الجسم الفردي هو كذا وكذا وأن تكون له هذه الصفة أو تلك". فلا توجد في الطبيعة الكمية قوانين تتحكم في تغيرات خواص الجسم مع الزمن. فبدلا من ذلك نجد قوانين تعيين تغير الاحتمالات مع الزمن وهذه التغيرات الرئيسية – التي أدخلتها نظرية الكم في علم الطبيعة – هي التي مكنتنا من إيجاد شروح مقبولة وافية للخواص المتقطعة وللطابع الإحصائي للأحداث في علم الظواهر الذي تلعب فيها الكمات الأولية للمادة والإشعاع أدوارا كبيرة.

ومع ذلك فما زالت هناك بعض مسائل صعبة لم يتم حلها بعد. وسنذكر هنا فقط بعضا من هذه المسائل، فالعلم لم يكن ولن يكون أبدا كتابا مغلقا، وإذ أن كل تقدم مهم يؤدي إلى بعث مسائل جديدة وكل تطور جديد تصحبه دائما مصاعب جديدة.

وقد رأينا أنه في الحالة البسيطة التي نعتبر فيها جسيما واحد لا أكثر، نستطيع الانتقال من الدراسة الكلاسيكية إلى الدراسة الكمية، أي من دراسة حركة الجسيمات في الزمان والمكان إلى دراسة أمواج الاحتمال. ولا شك أن معتقدات المجال المهمة في الطبيعة الكلاسيكية لم تغب عن بالنا، ولعلنا نتساءل عن كيف نستطيع وصف التفاعل بين

كمات المادة الأولية والمجال؟ وإذا كنا نحتاج إلى موجة احتمالية تنتشر في متصل ذي ثلاثين بعدا لدراسة حركة عشرة جسيمات، فإنه يلزمنا موجة أخرى تنتشر في متصل ذي عدد لا نهائي من الأبعاد لدراسة المجال طبقا للنظرية الكمية، والانتقال من فكرة المجال في النظرية الكلاسيكية إلى الموجة الاحتمالية الملائمة في الطبيعية الكمية أمر في غاية الصعوبة. ويمكننا أن نقول أن جميع المحاولات التي بذلت للانتقال من الوصف الكلاسيكي إلى الوصف الكمي للمجال حتى الآن لا تعتبر وافية بالغرض. وهناك مسألة أخرى أساسية؛ فقد استخدمنا أثناء دراستنا لطريقة الانتقال من الطبيعة الكلاسيكية إلى الطبيعة الكمية الطريقة القديمة غير النسبية التي لا يعتبر فيها الزمن بنفس الطريقة التي يعتبر بها المكان. فإذا حاولنا نبدأ بالوصف الكلاسيكي الذي تطبق فيه قواعد نظرية النسبية فإن انتقالنا إلى الطريقة الكمية يصبح أكثر تعقيدا. وهذه هي معضلة اليوم التي حاول علم الطبيعة الحديث حلها ولكن هذا الحل ما زال بعيدا عن الكمال. وهناك أيضا معضلة أخرى نشأت عندما حاول العلماء وضع نظريات وقواعد كمية لوصف الجسيمات الثقيلة التي تدخل في تركيب النواة. وعلى الرغم من النتائج العملية العديدة والمحاولات الكثيرة لشرح مشاكل النواة، فإننا ما زلنا نجهل أهم نواحي هذا الموضوع.

وليس هناك ثمة شك في أن الطبيعة الكمية قد نجحت في شرح جانب كبير من الحقائق وكانت النتائج النظرية في معظم الحالات متفقة تماما مع النتائج العملية. وقد أبعدتنا الطبيعة الكمية الحديثة كثيرا عن

وجهة النظر الميكانيكية القديمة وأصبح التقهقر إلى مواضعنا القديمة أمرا بعيد الاحتمال، ولكن ليس هناك شك أيضا في أنه يجب علينا أن نبني علم الطبيعة الحديث على أساس معتقدات المادة والمجال. وفي هذه الحالة تكون النظرية ثنائية وبعيدة عن فكرة إرجاع كل شئ ونسبته إلى المجال.

هل ستسلك التطورات المقبلة نفس الطريق الذي سلكته الطبيعة الكمية؟ أم هل يحتمل أن تنشأ أفكار ثورية جديدة في علم الطبيعة؟ وهل سيعاني طريق التقدم انحناءة أخرى كبيرة كما حدث ذلك مرات فيما مضى؟

وقد تركزت جميع معضلات الطبيعة الكمية حول بضع نقط رئيسية قليلة خلال السنوات الأخيرة، وينتظر علم الطبيعة حل هذه المعضلات بقلق، وليس هناك ما يدلنا على الكيفية أو الوقت الذي ستحل فيه هذه المشاكل.

علم الطبيعة وحقيقة الوجود:

ما هي النتائج العامة التي نستطيع استخلاصها من تطور علم الطبيعة الذي بسطناه هنا بطريقة عامة توضح لنا خطوطه الرئيسية فقط؟ وليس العلم مجرد مجموعة قوانين أو قائمة بحقائق غير مرتبطة بل هو ابتكارات العقل الإنساني بما فيه من معتقدات وأفكار نتيجة تفكير حر طليق. وتحاول النظريات الطبيعية تكوين صورة للحقيقة وإيجاد رابطة بينهما وبين عالم الشعور. وإذن تكون التزكية الوحيدة لتركيب عقد لنا هي فيما إذا كانت نظرياتنا هذه تنجح في إيجاد هذه العلاقة وفي الكيفية التي وجدت بها.

وقد رأينا حقائق جديدة نشأت عن التقدم في علم الطبيعة، ولكن اكتشاف الحقائق لم يكن مقصورا على علم الطبيعية، وإذ أن الإنسان قد بدأ منذ فجر التاريخ في تمييز ما حوله من الأجسام؛ فالصور التي كونها العقل الإنساني عن الشجرة والحصان والجسم المادي نتجت عن التجربة على الرغم من أن التأثيرات التي نتجت عنها هذه الصور أولية بالنسبة لعالم الظواهر الطبيعة. والقطة التي تحاور فأرا تكون في نفسها صورة خاصة بذلك، وحيث أن القطة تعامل كل فأر بنفس الطريقة فإننا نستنتج أنها لا بد كونت في نفسها صورا وطرقا هي أدلتها في تأثرها بالحياة الخارجية.

وطبيعي أن ثلاثة أحجار شيء مختلف عن شجرتين، وشجرتين شئ مختلف عن حجرين وليست فكرة الأرقام البحتة ٢ ، ٣ ، ٤ ،.. (دون

أي ارتباط بالأشياء التي تميزها) سوى من ثمار التفكير الإنساني لوصف حقيقة عالمنا.

وبفضل شعورنا الباطني بمرور الزمن استطعنا تنظيم إحساساتنا لكي تتمكن من الحكم على أن حدثا ما قد سبق آخر، ولكن لكي نميز كل لحظة زمنية تمر برقم بواسطة بواسطة استخدام ساعة أي لكي نعتبر الزمن متصلا ذا بعد واحد هو أيضا في حد ذاته اختراع للذهن الإنساني. وكذلك الحال في معتقداتنا الهندسية التقليدية واعتبار فضاءنا كعالم ذي ثلاثة أبعاد.

وقد بدأ علم الطبيعة حقا باختراع الكتلة والقوة والمجموعة القاصرة. وهذه جميعها ابتكارات للعقل الإنساني أدت إلى نشوء وجهة النظر الميكانيكية. ويتكون العالم الخارجي – من وجهة نظر العلماء الطبيعيين في أوائل القرن التاسع عشر – من جسيمات تؤثر عليها قوى بسيطة تتوقف على المسافة. وقد حاول هؤلاء العلماء التمسك بفكرة إمكانهم شرح جميع أحداث الطبيعة على أساس هذه الفروض الأساسية. ولكن الصعوبات المتعلقة بانحراف الإبرة المغناطيسية، وتركيب المهام للمجال الكهرومغناطيسي، وقد احتجنا إلى خيال علمي جرئ لندرك تماما أنه ليست الأجسام المادية ولكن ما يوجد بينهما – أي المجال – قد يكون عاملا أساسيا لتنظيم وفهم الأحداث.

وقد أدت تطورات العلم الحديث إلى القضاء على المعتقدات القديمة واستحداث أخرى جديدة؛ فقد قضت نظرية النسبية على فكرة الزمن المطلق والمجموعة الإحداثية القاصرة. ولم يعد مسرح الحوادث هو متصل الفضاء ذي الثلاثة أبعاد والزمن ذو البعد الواحد، بل أصبح هو متصل المكان والزمان ذا الأربعة الأبعاد الذي تختلف قوانين تحويله عن القوانين القديمة. ولم نعد نحتاج إلى المجموعة الإحداثية القاصرة إذ أصبحت كل المجموعات الإحداثية سواءً وتعتبر جميعها مناسبة لوصف أحداث الطبيعة.

وقد استحدثت نظرية الكم أيضا آراء ومعتقدات جديدة وأساسية، فقد استبدلت فكرة عدم الاتصال بالاتصال وظهرت قوانين الاحتمال بدلا من القوانين التي تتحكم في حركة الأجسام الفردية. وفي الحقيقة أن الآراء التي استحدثت في علم الطبيعة الحديث تختلف عن تلك التي شاعت عند بدء التطور العلمي. ولكن هدف النظريات العلمية كان وما زال ثابتا لم يتغير. وتساعدنا النظريات الطبيعية على تلمس طريقنا وسط جموع الحقائق العملية محاولين تنظيم وتفهم عالمنا الإحساسي. ونود دائما في أن تتبع الحقائق العملية نتائج النظريات والآراء الموضوعة، لن يكون هناك وجود للعلم إذا لم نعتقد أننا نستطيع اكتشاف الحقائق بواسطة نظرياتنا الموضوعة، وإذا لم نكن نعتقد في تركيب العلم على أساس دقيق منظم. وستظل هذه العقائد دائما الدوافع الأساسية لجميع الاستحداثات العلمية. وفي جميع مجهوداتنا وكفاحنا بين الآراء القديمة

والحديثة نلمس الحاجة للفهم والإدراك العميق لنظام العالم الدقيق، هذا الإدراك الذي يزداد وثوقا وقوة بما يقابله من الصعاب.

الخلاصة:

تدفعنا الحقائق العلمية الكثيرة في عالم الظواهر الذرية مرة أخرى إلى وضع نظريات طبيعية حديثة. وتتميز المادة بتركيب حبيبي إذ تتركب من جسيمات أولية تسمى بالكمات الأولية للمادة. أي أن الشحنة الكهربائية تتميز بتركيب حبيبي وكذلك الطاقة أيضا، وذلك هو الأهم من وجهة نظر نظرية الكم. ويتكون الضوء من كمات الطاقة المسماة بالفوتونات. هل يتكون الضوء من موجات أو من سيل من الفوتونات؟ وهل يتكون الشعاع الإلكتروني من سيل من الكهارب أم من موجات؟ هذه هي الأسئلة التي فرضت على علم الطبيعة كنتيجة للتجارب العملية، ولكي نحاول الإجابة على هذه الأسئلة يجب أن نترك جانبا وصف الأحداث الذرية كحوادث في المكان والزمان، إذ يجب أن يزداد تحررنا من قيود النظرية الميكانيكية القديمة، ويضع علم الطبيعة الكمي لنا قوانين تتحكم في الجموع لا الأفراد؛ فنحن نتكلم عن الاحتمالات وعن القوانين التي تتحكم في تغيرها مع الزمن بالنسبة لجموع كبيرة من الأفراد لا عن القوانين التي تصف حركة الأجسام الفردية المستقبلة، كما هي الحال في قوانين الميكانيكا غير الكمية.

الفهرس

الباب الثالث

البابُ الرابع